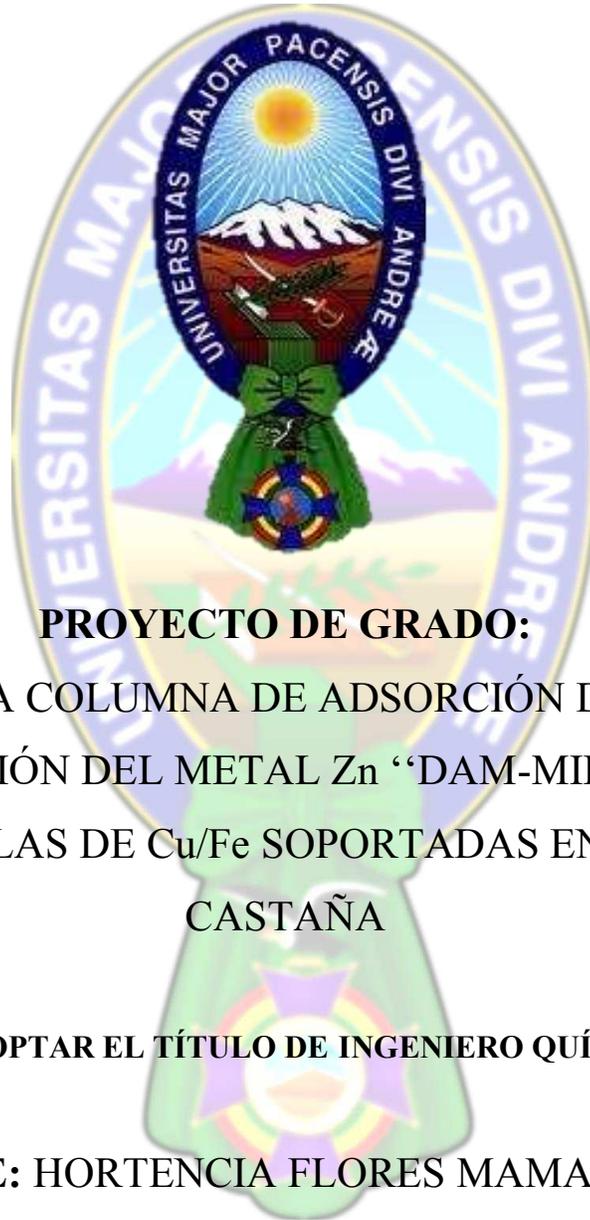


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO DE GRADO:

DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN DE LECHO FIJO
PARA REMOCIÓN DEL METAL Zn “DAM-MILLUNI”, CON
NANOPARTICULAS DE Cu/Fe SOPORTADAS EN CASCARA DE
CASTAÑA

PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

POSTULANTE: HORTENCIA FLORES MAMANI

TUTOR: ING. CRISTHIAN CARRASCO VILLANUEVA Ph. D

LA PAZ-BOLIVIA

2024



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

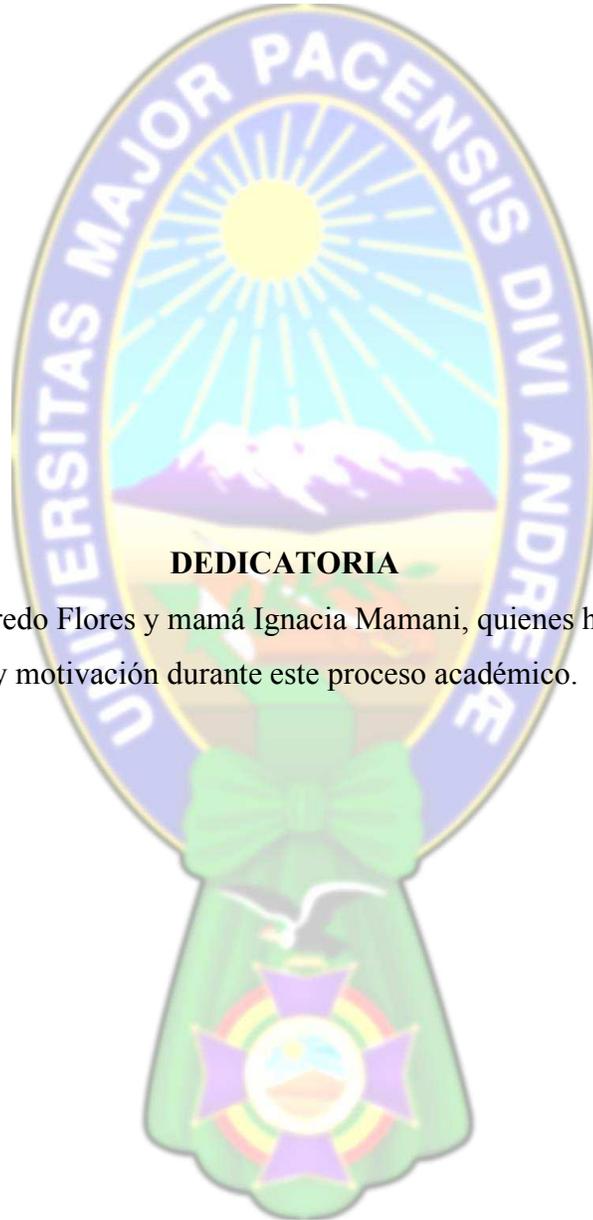
LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.



DEDICATORIA

A mi papá Alfredo Flores y mamá Ignacia Mamani, quienes han sido mi mayor apoyo y motivación durante este proceso académico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi tutor, Ing. Cristhian Carrasco Villanueva PhD., por su infinita paciencia, valiosa orientación y apoyo inquebrantable en todo momento. Su dedicación y conocimiento han sido fundamentales para mi crecimiento académico.

Agradecer al tribunal evaluador, conformado por la Ing. Esperanza Del Carmen Diaz G. e Ing., Santiago Morales M. PhD., por su paciencia, dedicación de tiempo, así como por las críticas constructivas y valiosas aportaciones.

Agradezco a mi papá Carlos Alfredo, a mi mamá Ignacia, mi hermana Sonia, mi hermano Nelson y mi hermanita Princela, por estar siempre a mi lado, siendo mi principal apoyo y motivación.

Agradezco a mi compañero de vida, Marcos Adolfo Paco Churata, por su constante apoyo y confianza en mí.

A mis queridos amigos y amigas Jaqueline, Andrea, Gabriela, Marcelo y a todos aquellos que no he mencionado pero que siempre estarán en mi corazón, con quienes he compartido los mejores momentos en las aulas de la querida Facultad de Ingeniería, les agradezco de todo corazón por su apoyo incondicional y por las inolvidables aventuras que hemos vivido juntos. ¡Gracias!

RESUMEN

La actividad minera genera residuos y pasivos ambientales que tienen impacto significativo en el medio ambiente y en la salud de las comunidades cercana a las minas. Para enfrentar esta situación, es necesario explorar tecnologías avanzadas como la nanotecnología, que ha mostrado importantes avances tecnológicos y aplicaciones en diversas áreas. En el presente proyecto, se diseñó una columna de adsorción de lecho fijo utilizando nanopartículas de cobre y hierro soportadas en cascara de castaña como material adsorbente para la remoción del metal zinc (Zn) de los drenajes ácidos de mina (DAM) provenientes de la boca de Milluni, distrito 13, municipio de la ciudad de El Alto.

El proyecto se desarrolló a partir de estudios preliminares y criterios de diseño ingenieril, determinando el perfil de concentración a lo largo de la columna mediante un modelo matemático. Posteriormente, se realizó la simulación en Aspen Adsorption V14, variando los caudales de (10, 18, 25 y 50 mL/s) y alturas de lecho (0.5, 0.8, 1 y 1.2 m). Los resultados de las simulaciones indicaron que el tiempo de ruptura y de saturación aumentan con la altura del lecho y disminuyen con el caudal.

Con base en estos resultados, se definió el diseño final de la columna de adsorción. Seleccionando una configuración óptima de operación con un caudal de 18 mL/s, una altura de lecho de 1 m y un diámetro de 0.16 m. La simulación para esta configuración mostró tiempos de ruptura y saturación de 15 y 70 horas, respectivamente. Esto permite que, hasta el tiempo de ruptura, la columna trate 0.567 m^3 de drenaje ácido de mina, alcanzando una eficiencia del 96%.

Palabras clave: Diseño, Columna de Adsorción, Simulación, Castaña, Nanopartículas.

ABSTRACT

Mining activity generates waste and environmental liabilities that have a significant impact on the environment and the health of the communities near the mines. To address this situation, it is necessary to explore advanced technologies such as nanotechnology, which has shown significant technological advances and applications in various areas. In the present project, a fixed bed adsorption column was designed using copper and iron nanoparticles supported on chestnut shell as an adsorbent material for the removal of zinc metal (Zn) from acid mine drainage (AMD) coming from the mouth. of Milluni, district 13, municipality of the city of El Alto.

The project was developed from preliminary studies and engineering design criteria, determining the concentration profile along the column using a mathematical model. Subsequently, the simulation was carried out in Aspen Adsorption V14, varying the flow rates (10, 18,25 and 50 mL/s) and bed heights (0.5, 0.8, 1 and 1.2 m). The results of the simulations indicated that the rupture and saturation time increase with bed height and decrease with flow

Based on these results, the final design of the adsorption column was defined. Selecting an optimal operating configuration with a flow rate of 18 mL/s, a bed height of 1 m and a diameter of 16 cm. The simulation for this configuration showed rupture and saturation times of 15 and 70 hours, respectively. This allows the column to treat 0.567 m³ of acid mine drainage up to the rupture time, reaching an efficiency of 96%.

Keywords: Design, Adsorption Column, Simulation, Chestnut, Nanoparticles.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4.1. Justificación Técnica.....	5
1.4.2. Justificación Económica.....	5
1.4.3. Justificación Social.....	6
1.4.4. Justificación Ambiental.....	6
1.5. ALCANCES Y LIMITANCIAS.....	7
1.5.1. Alcances.....	7
1.5.2. Limitaciones.....	7
MARCO TEÓRICO	8
2.1. ADSORCIÓN.....	9
2.1.1. Adsorbato.....	9
2.1.2. Adsorbente.....	9
2.2. TIPOS DE ADSORCIÓN.....	9
2.2.1. Adsorción Física.....	9
2.2.2. Adsorción Química.....	10
2.3. MATERIALES ADSORBENTES.....	10
2.3.1. Carbón Activo.....	10

2.3.2. Gel de sílice	11
2.3.3. Alúmina Activada.....	11
2.3.4. Zeolitas tipo tamiz molecular	12
2.3.5. Polímeros o resinas sintéticas.....	13
2.3.6. Nano partículas	13
2.4. NANOTECNOLOGIA.....	14
2.4.1. Síntesis de Nanopartículas.....	14
2.4.2. Composito y Nanocomposito	17
2.4.2.1. Composito.....	17
2.4.2.2. Nanocomposito.....	17
2.4.2.3. Aplicaciones de Nanocompositos.....	18
2.4.2.4. Aplicación de Nanocomposito en la Remediación Medio Ambiental.....	19
2.6. TIPOS DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN	20
2.5.1. Columnas de lecho fijo.....	20
2.5.2. Columnas de lecho móvil	21
2.6. DISEÑO Y MODELACIÓN DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN DE LECHO FIJO ...	22
2.6.1. Criterios de Diseño de Columnas de Adsorción.....	22
2.6.1.1. Selección del material Adsorbente.....	23
2.6.1.3. Distribución de Tamaño de partículas	23
2.6.1.4. Distribución de poros.....	23
2.6.1.6. Consideración de Presión y Temperatura	23
2.5.1.7. Regeneración y ciclos de Operación.....	23
2.6.1.2. Tamaño y forma de la columna	23
2.6.1.5. Velocidad de flujo y Tiempo de contacto.....	24
2.6.1.8. Análisis de costos y Eficiencia	24

2.6.2.	Modelación Matemática de Columnas de Adsorción	24
2.6.2.1.	Modelos matemáticos empíricos.....	25
2.6.2.2.	Modelos Matemáticos Teóricos.....	27
2.7.	EL AREA DE ESTUDIO EN EL PRESENTE PROYECTO DE GRADO	28
2.7.1.	La Minería en Bolivia.....	28
2.7.2.	Minería en Milluni.....	29
2.7.3.	Lagunas de Milluni.....	30
2.7.4.	Milluni como Pasivo Ambiental.....	33
2.7.5.	Drenajes Ácidos de Mina(DAM).....	35
2.7.6.	Reacciones Químicas de Formación de Drenajes Ácidos de Mina	36
2.7.7.	Oxidación de Minerales Sulfurados.....	37
2.7.8.	Oxidación de los iones Ferrosos	37
2.8.	TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO DE DAM.....	37
2.8.1.	Tratamientos activos.....	37
2.8.2.	Tratamientos Pasivos	38
2.9.	CASCARA DE CASTAÑA COMO SOPORTE DE LAS NANOPARTÍCULAS.....	39
2.9.1.	Propiedades de la cascara de castaña.....	39
2.10.	ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS PARA EL PRESENTE PROYECTO.....	40
METODOLOGÍA.....	43
3.1.	SELECCIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES DE DISEÑO DE COLUMNA... ..	44
3.1.1.	Variables de Operación de la columna de adsorción de lecho fijo.....	44
3.1.1.2.	Concentración final del efluente.....	44
3.1.1.3.	Temperatura de Operación (T).....	44
3.2.	EVALUACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	45
3.2.1.	Balance de materia.....	45

3.2.2.	Dimensionamiento de la columna de adsorción	48
3.3.	SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE ADSORCIÓN.....	49
3.3.1.	Herramientas y Software utilizados.....	49
3.3.2.	Definición del Sistema.....	49
3.3.3.	Condiciones de Operación.....	50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		52
4.1.	RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	53
4.2.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN LA ADSORCIÓN DE Zn	54
4.2.1.	Simulación de la adsorción de zinc con caudal 10 mL/s.....	54
4.2.2.	Simulación de la adsorción de zinc con caudal 18 ml/s.....	55
4.2.3.	Simulación de la adsorción de zinc con caudal 25 ml/s.....	57
4.2.4.	Simulación de la adsorción de zinc con caudal 50 ml/s.....	58
4.2.5.	Comparación de curvas de saturación.....	59
4.2.6.	Simulación de la adsorción de Zn con altura de lecho 50cm.....	61
4.2.7.	Simulación de la adsorción de zinc con altura de lecho 80cm.....	62
4.2.8.	Simulación de la adsorción de zinc con altura de lecho 100cm.....	63
4.2.9.	Simulación de la adsorción de zinc con altura de lecho 120cm.....	63
4.2.10.	Simulación de la adsorción comparación de alturas de lecho.....	64
4.2.11.	Comparación Cambio de caudal y altura de lecho.....	66
4.3.	Esquema de Instalación de la Columna de Adsorción de Lecho Fijo.....	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		74
5.1.	CONCLUSIONES	75
5.2.	RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA.....		76
ANEXOS 82		

INDICE DE FIGURAS

Figura1.	Carbón activo	11
Figura2.	Gel de Sílice	11
Figura3.	Alúmina Activada	12
Figura4.	Zeolitas tipo tamiz.....	12
Figura5.	Tipos de nanomateriales.....	13
Figura6.	Métodos de síntesis de Nanopartículas metálicas	14
Figura7.	Columna de Adsorción de lecho fijo.....	20
Figura8.	Columna de lecho móvil	22
Figura9.	Panorámica de Milluni	30
Figura10.	Laguna Pata Khota.....	31
Figura11.	Laguna Jankho Khota	31
Figura12.	Laguna Milluni Chico.....	32
Figura13.	Laguna Milluni Grande.....	32
Figura14.	Mapa ubicación de pasivos Ambientales en la región de Milluni.....	33
Figura15.	Formación de oxido férrico sobre la superficie.....	35
Figura16.	Etapas de tratamiento convencional	38
Figura17.	Castaña en todas sus presentaciones.....	39
Figura18.	Volumen de control para una columna de lecho fijo	45
Figura19.	Definición del sistema de adsorción.....	49
Figura20.	Esquema de simulación	50
Figura21.	Ilustración del empaque de Adsorción.....	69
Figura22.	Esquema de instalación de la Columna de adsorción de lecho fijo	70
Figura23.	Instalación de columnas de adsorción en paralelo.....	72

INDICE DE TABLAS

Tabla1.	Ventajas y desventajas de Nanocomposito	18
Tabla2.	Aplicaciones de las Nanocompositos	19
Tabla3.	Variables para Diseño.....	23
Tabla4.	Minerales extraídos.....	29
Tabla5.	Metales pesados presentes en drenaje acido de mina de socavones de Mina de Milluni 34	
Tabla6.	Tipos de drenaje acido de Mina.....	36
Tabla7.	Propiedades de la cascara de castaña.....	39
Tabla8.	Características del DAM- Milluni	40
Tabla9.	Características de nanocomposito	41
Tabla10.	Parámetros y Condiciones.....	48
Tabla11.	Parámetros de Simulación	51
Tabla12.	Resumen: Tiempos de saturación y ruptura para distintos caudales	60
Tabla13.	Tiempos de saturación y ruptura para distintas alturas de lecho	66
Tabla14.	Materiales necesarios para la construcción de la columna de lecho fijo	68
Tabla15.	Condiciones de operación de la columna diseñada	69
Tabla16.	Concentraciones del efluente Caudal 10mL/s	89
Tabla17.	Concentraciones del efluente Caudal 18mL/s	89
Tabla18.	Concentraciones del efluente Caudal 25 mL/s	90
Tabla19.	Concentraciones del efluente Caudal 50 mL/s	91
Tabla20.	Concentraciones del efluente con altura de lecho 0.5 m.....	92
Tabla21.	Concentraciones del efluente con altura de lecho 0.8 m.....	93
Tabla22.	Concentraciones del efluente con altura de lecho 1 m.....	93

Tabla23.	Concentraciones del efluente con altura de lecho 1.2 m.....	94
-----------------	--	-----------

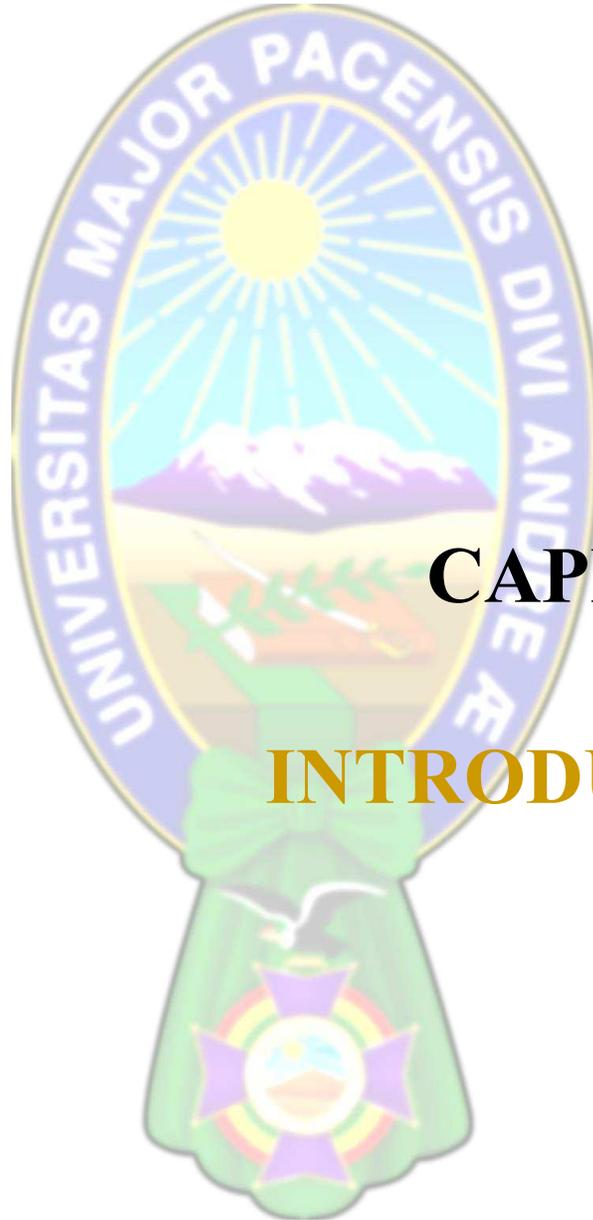
INDICE DE GRAFICOS

Grafico1.	Perfil de concentración en función del tiempo y altura de Lecho	53
Grafico2.	Curva de ruptura caudal 10 mL/s	54
Grafico3.	Curva de ruptura caudal 18 mL/s	56
Grafico4.	Curva de ruptura caudal 25 mL/s	57
Grafico5.	Curva de ruptura caudal 50 mL/s	58
Grafico6.	Curva de ruptura a diferentes caudales.....	59
Grafico7.	Curva de ruptura con 0.50 m de altura de lecho	61
Grafico8.	Curva de ruptura con 0.80 m de altura de lecho	62
Grafico9.	Curva de ruptura con 1m de altura de lecho	63
Grafico10.	Curva de ruptura con 1.2 m de altura de lecho	63
Grafico11.	Alturas de lecho.....	64
Grafico12.	Concentración de efluente(ppm) vs tiempo(h)	67

ANEXOS

Anexo 1.	PROGRAMA DE MATLAB	82
Anexo 2.	CONCENTRACIÓN VS LONGITUD DE LECHO	84
Fuente:	grafico de Matlab	84
Anexo 3.	CONCENTRACIÓN VS TIEMPO Y LONGITUD DE LECHO	84
Fuente:	grafico de Matlab	84
Anexo 4.	PROGRAMA DE SIMULACION.....	84
Anexo 5.	RESULTADOS DE LA SIMULACION VARIANDO CAUDALES.....	89
Anexo 6.	RESULTADOS DE LA SIMULACION VARIANDO ALTURAS DE LECHO	





CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1.ANTECEDENTES

Los Pasivos Ambientales en Bolivia son un tema de gran importancia y preocupación. Según el Servicio Geológico Minero(2014), se ha inventariado y registrado un 40 % del total de pasivos mineros en toda Bolivia de 283 , los departamentos más afectados por los pasivos ambientales son Potosí (104 pasivos mineros), Oruro (70 pasivos mineros), Chuquisaca (52 pasivos mineros), La Paz (18 pasivos mineros), Santa Cruz (16 pasivos mineros), Cochabamba (7 pasivos mineros), Beni (3 pasivos mineros) y Tarija (13 pasivos mineros), (minus.net/mineria-sustentable, 2018).

El impacto de la minería es irremediable y no termina con la explotación misma, si no que queda con el pasivo ambiental por muchos años porque el suelo removido deja muchos metales expuestos a la lluvia que arrastra a los cursos de agua minerales que generan enormes problemas al medio ambiente y al hombre. (Deber, 2017)

La mina de Milluni, ubicada a 40 Km al norte de La Paz, fue explotada durante un siglo. Durante su vida útil, se extrajeron unos 80000 m³ de roca mineralizada, lo que afecto el valle y los lagos circundantes. Los desechos de la mina generan drenajes ácidos, una fuente significativa de contaminación del agua (Aranguren, 2016). Lamentablemente, algunas lagunas de Milluni se ven afectadas por la escorrentía de agua de la mina y se sabe poco sobre el alcance o la gravedad de esta contaminación (Salvarredy-Aranguren, 2008). El agua del valle de Milluni es la principal fuente de agua para La Paz-El Alto. Durante la estación húmeda, hay excedentes de agua que fluyen aguas abajo del valle, lo que podría afectar las áreas suburbanas y de cultivo (Aranguren, 2016).

Es importante mencionar que el drenaje ácido de mina puede persistir durante décadas e incluso cientos de años después de que la mina ha dejado de operar (Centeno, 2016). Según la investigación llevada a cabo por Campanini en su estudio llamado “Aguas y minería en Bolivia ¿Riesgos Lejanos?”, realizado en el Centro de Documentación e Información Bolivia (CEDIB), se indica que las aguas ácidas provenientes de Milluni son sometidas a un proceso de pretratamiento en la estación “La Calera”, donde se lleva a cabo la neutralización-precipitación utilizando cal. Este procedimiento tiene como objetivo la precipitación de los metales pesados que se encuentran disueltos en el agua. Posteriormente, las aguas son tratadas de manera convencional en la planta de Achachicala para asegurar su calidad potable.

Las investigaciones realizadas por (Portillo M. E., 2017) y (Sanchez C. E., 2021) en el drenaje ácido de Milluni, determinaron que los parámetros de pH, concentración de cobre, zinc y hierro exceden los límites permitidos para cuerpos de agua de clase C, según lo establecido por el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley del Medio Ambiente N°1333.

Según (Marimon, 2018), la nanotecnología es una alternativa potencialmente atractiva para mejorar la eficiencia y calidad de los procesos de remediación por adsorción. Las nanopartículas, debido a su tamaño y alta superficie, presentan una alta capacidad de adsorción. Sin embargo, tienden a aglomerarse debido a su alta energía superficial, lo que afecta su uso como adsorbente. Para superar esta desventaja, se pueden soportar las nanopartículas en materiales adsorbentes con porosidad o cavidades, donde se evita la agregación y se mejora la eficiencia de los procesos de separación en la remediación ambiental.

Según el estudio de (Sanchez C. E., 2021), se indica que la cascara de castaña es un buen material de soporte para las nanopartículas. Durante su experimento de síntesis de compuesto (nanopartículas de cobre y hierro depositadas en cascara de castaña), observó nanopartículas esféricas de 15nm. Además, bajo condiciones de pH=5 y a una temperatura de 20 °C, se logró la adsorción de Zn, alcanzando una capacidad máxima de adsorción de 9,2 mg Zn por gramo de adsorbente, según el modelo de Langmuir, y logrando una remoción del 30% de Zn del DAM Milluni.

Las técnicas de adsorción con columnas de adsorción de lecho fijo son ampliamente utilizadas en el tratamiento de aguas residuales contaminadas. El agua a tratar se hace pasar a través de un lecho de material adsorbente en estado granular, a la velocidad adecuada para asegurar el tiempo de contacto necesario. El proceso de transferencia en la columna se describe a través de una ecuación de balance de masas y una ecuación que describe la cinética de intercambio entre la fase líquida y la sólida. (Dima, Mandelman, Zaritzki, & Ferrari, 2022).

Se han realizado estudios para la adsorción de diversos contaminantes. Por ejemplo, se investigó la dinámica de Cr VI de soluciones acuosas en columnas de lecho fijo utilizando aserrín. (Cardenas & Ortega, 2015). Otro estudio presentó los resultados de ensayos de bioadsorción de Pb +2 y Cd +2 con cascara de cacao en columnas de lecho fijo.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El incremento de la presencia de metales pesados, como el zinc (Zn), en el drenaje ácido de mina (127 ppm), superando los límites permitidos (5 ppm como máximo) según Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), puede generar consecuencias negativas en los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos.

La presencia del zinc (Zn) en las aguas residuales puede ocasionar diversas problemáticas, entre ellas la contaminación de las fuentes de agua, lo cual impacta a los organismos acuáticos y a la calidad del agua destinada al consumo humano. Las elevadas concentraciones de zinc pueden resultar tóxicas para los organismos acuáticos, afectando su supervivencia y reproducción, pueden acumularse en los tejidos, generando procesos de bioacumulación y biomagnificación en la cadena alimentaria.

A pesar de que el zinc es esencial para la salud humana, la exposición a altas concentraciones de puede provocar diversos problemas de salud, como náuseas, vómitos, dolor abdominal y diarrea (Larry, 2023).

El presente proyecto tiene como objetivo proponer una alternativa para tratar las aguas de drenaje ácido de minas mediante el diseño de una columna de lecho fijo que emplea nanopartículas bimetálicas soportadas en cascara de castaña como material adsorbente. El uso de las nanopartículas representa un avance tecnológico significativo en la adsorción de metales pesados, ya que estas partículas son altamente eficientes y selectivas para adsorber metales específicos como es el caso del zinc (Zn).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Diseñar una columna de adsorción de lecho fijo utilizando como material adsorbente nanopartículas de cobre y hierro soportados en cascara de castaña, para la remoción del metal Zinc, de las aguas de drenaje ácido de Milluni.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar variables significativas para el diseño de la columna basado en estudios previos obtenidos a escala de laboratorio tipo Bach.

- Evaluar modelos matemáticos basados en el tipo de adsorbente y el proceso de adsorción en investigaciones similares.
- Simular el proceso de adsorción en la columna de lecho fijo diseñada, con el propósito de analizar su dinámica.

1.4.JUSTIFICACIÓN

1.4.1. Justificación Técnica

Las columnas de adsorción de lecho fijo son sistemas ampliamente utilizados en diversas industrias para separar los componentes de una mezcla mediante la adsorción selectiva sobre un lecho de adsorbente sólido. Estos equipos se destacan por su facilidad de operación y su eficiencia en la captura de contaminantes específicos. Una de las principales ventajas técnicas de la columna de lecho fijo es la posibilidad de recuperar los compuestos adsorbidos, permitiendo su reutilización o aplicación en otros procesos industriales, lo que incrementa la sostenibilidad y la eficiencia del sistema.

En particular, el uso de nanopartículas de cobre y hierro soportadas en cascara de castaña como material adsorbente aporta beneficios adicionales. Las nanopartículas ofrecen una superficie específica elevada y una alta capacidad de adsorción, lo que aumenta la eficiencia del proceso en la remoción de metales pesados como el zinc. La cascara de castaña, al ser un material natural y poroso, facilita la dispersión uniforme de las nanopartículas, mejorando así el rendimiento del lecho.

Además, las columnas de adsorción de lecho fijo con este tipo de adsorbentes innovadores, puede ser una solución avanzada y efectiva para el tratamiento de aguas contaminadas.

1.4.2. Justificación Económica

El uso de la cascara de castaña como material de soporte ofrece ventajas económicas significativas. Primero, las cascara de castaña son un residuo de la industria alimentaria, lo que contribuye a la valoración de residuos y a la reducción de costos del material. Al reutilizar un subproducto agrícola que generalmente se desecha, se pueden obtener ahorros significativos en comparación con materiales tradicionales como el carbón activado. Además, las nanopartículas de cobre y hierro soportadas en cascara de castaña han demostrado ser altamente eficientes en la remoción del metal zinc (Sanchez C. E., 2021).

1.4.3. Justificación Social

El diseño de una columna de adsorción de lecho fijo representa una solución innovadora y sostenible para tratar este tipo de aguas contaminadas, especialmente en el contexto de drenajes ácidos de mina. Esta tecnología puede ser implementada en sitios mineros y otras industrias que generan drenajes ácidos como una medida preventiva para evitar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. De esta manera se contribuye a la protección del medio ambiente y se promueve la responsabilidad social de las empresas hacia la conservación de los recursos naturales. Además, el uso de un subproducto agrícola como la cascara de castaña fomenta prácticas de economía circular y apoya a los agricultores locales, creando un ciclo de beneficios económico y social.

Implementar tecnologías sostenibles como las columnas de adsorción de lecho fijo pueden mejorar la imagen pública de las empresas y aumentar la confianza de la comunidad en sus prácticas ambientales. Al contribuir a la mejora de la calidad del agua y la protección de los recursos naturales, estas iniciativas fortalecen el vínculo entre las empresas y las comunidades, promoviendo un desarrollo más equitativo y sostenible.

1.4.4. Justificación Ambiental

La implementación de esta tecnología en el tratamiento de drenajes ácidos de mina tiene un impacto positivo significativo en la protección de cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Al emplear esta tecnología para reducir la concentración de metales pesados, como Zn en el agua tratada, se mejora la calidad del agua. Esta reducción en la contaminación contribuye a minimizar los efectos negativos de las actividades mineras en los ecosistemas acuáticos.

El tratamiento eficiente de drenajes ácidos es especialmente importante en áreas donde la minería representa una fuente importante de contaminación. Los drenajes ácidos de mina pueden alterar drásticamente la química del agua, afectando la calidad de agua potable disponible para las comunidades locales.

Además, la preservación de los recursos hídricos es vital no solo para las comunidades que depende de del agua para su consumo, sino también para mantener la biodiversidad y al mantenimiento de los servicios ecosistémicos que estos recursos hídricos proporcionan.

1.5. ALCANCES Y LIMITANCIAS

1.5.1. Alcances

Este proyecto se enfoca en el diseño y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo estudiando específicamente la remoción de zinc (Zn) siendo este el segundo metal de mayor concentración en el de drenajes ácidos de mina en Milluni, utilizando como material adsorbente nanocomposito de Cobre y hierro.

1.5.2. Limitaciones

No se realizó el estudio de remoción de otros metales pesados, ya que aún no se cuenta con estudios en un proceso batch sobre la capacidad del nanocomposito para adsorber selectivamente otros metales.





CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla el fundamento teórico, metodológica del diseño y operación de columnas de adsorción de lecho fijo, con énfasis en el uso de nanopartículas como material adsorbente para la remoción de metales pesados de drenajes ácidos de mina. Se exploran los principios de la adsorción y se revisan estudios previos relevantes que han empleado tecnologías similares. Además, se discuten los modelos matemáticos utilizados para simular el comportamiento de la columna, incluyendo ecuaciones diferenciales parciales. Este marco teórico proporciona la base necesaria para entender los criterios de diseño de una columna de adsorción de lecho fijo.

2.1. ADSORCIÓN

La adsorción es una operación de separación, mediante el cual una o más sustancias presentes en una fase móvil, ya sea líquida o gaseosa, se retiene en la superficie de un material poroso sólido, logrando finalmente una separación completa. Las causas de este proceso pueden ser por interacciones electrostáticas, dispersas, alifáticas o fenómenos selectivos como el intercambio iónico u otras formas de interacción específica. Este proceso de adsorción está formado por dos componentes:

2.1.1. Adsorbato

Es la sustancia que se encuentra en la fase líquida o gas, que se adhiere en la superficie del adsorbente.

2.1.2. Adsorbente

Es un material sólido que tiene la capacidad de adsorber otras sustancias en su superficie durante el proceso de adsorción. Este material se caracteriza por tener una estructura porosa y una gran área superficial específica que facilita la captura y retención de moléculas en su superficie.

2.2. TIPOS DE ADSORCIÓN

Existen dos tipos principales de adsorción:

2.2.1. Adsorción Física

También conocida como **fisisorción**, se caracteriza porque las partículas adsorbidas mantienen su identidad y forman múltiples capas sobre la superficie del adsorbente. Este fenómeno es reversible y se produce debido a fuerzas de Van Der Waals. Además, este tipo de adsorción se ve afectado por la temperatura y presión, siendo favorable a bajas temperaturas. Es común encontrar este tipo

de adsorción en gases y líquidos condensados y es particularmente importante en aplicaciones como la purificación de agua y la separación de gases.

2.2.2. Adsorción Química

También conocida como **quimisorción**, este tipo de adsorción se produce cuando las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie del adsorbente, formando enlaces covalentes, iónicos o coordinados. A diferencia de la adsorción física, la quimisorción no va más allá de una mono capa en la superficie del adsorbente.

La quimisorción es generalmente más específica y selectiva que la adsorción física, lo que hace que las moléculas se unen de manera más específica a ciertos sitios activos en la superficie del adsorbente. Además, puede ser irreversible en algunos casos, especialmente cuando se forman enlaces químicos fuertes entre el adsorbato y el adsorbente.

Este tipo de adsorción presenta diversas aplicaciones, incluyendo la catálisis heterogénea y la eliminación de contaminantes específicos en procesos de purificación de agua y aire.

2.3. MATERIALES ADSORBENTES

Un buen adsorbente se caracteriza por su alta porosidad, gran área superficial y la presencia de sitios específicos de adsorción. La mayoría de los adsorbentes utilizados en el control de la contaminación tienen una estructura porosa, lo que aumenta su área superficial y la velocidad de adsorción. Se prefiere un adsorbente con área superficial suficientemente grande y que requiera menos tiempo para alcanzar el equilibrio de adsorción. Esto se debe a que estos adsorbentes tienen mayor capacidad de eliminar contaminantes y una velocidad de adsorción más rápida.

2.3.1. Carbón Activo

Es un material micro cristalino que proviene de la descomposición térmica de madera, cortezas vegetales, carbón, etc., y presenta áreas superficiales de 300 a 1200 m²/g con un diámetro de poro de 10 a 60 Å. Las sustancias orgánicas generalmente adsorben carbón activo.

Figura1. Carbón activo

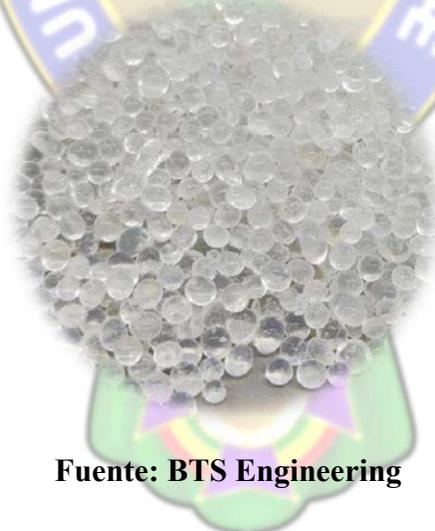


Fuente: Condorchem

2.3.2. Gel de sílice

Este material adsorbente se produce mediante el tratamiento con ácido una solución de silicato de sodio, seguido de un proceso de secado. Presenta una superficie específica que oscila entre 600 y 800 m²/g, con un diámetro promedio de poro que varía entre 20 y 50 Angstroms. Se usa principalmente en la deshidratación de gases líquidos y en la separación de hidrocarburos debido a su alta capacidad para adsorber moléculas de agua y otros compuestos orgánicos.

Figura2. Gel de Sílice



Fuente: BTS Engineering

2.3.3. Alúmina Activada

Este material se prepara activando el óxido de aluminio hidratado mediante un proceso de calentamiento para eliminar el agua. Este material se utiliza principalmente para la deshidratación de gases y líquidos debido a su alta capacidad de adsorción. Presenta áreas superficiales que suelen

estar en el rango de 200 a 500 m²/g, con un diámetro promedio de poro que varía entre 20 y 140 Angstroms.

Figura3. Alúmina Activada



Fuente: ADS. Industrial

2.3.4. Zeolitas tipo tamiz molecular

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos porosos que configuran una estructura de red cristalina abierta, caracterizada por su precisa uniformidad en los poros. Esto difiere con otros tipos de adsorbentes que presentan una amplia gama de tamaños de poro. Las distintas zeolitas exhiben tamaños de poro que van desde aproximadamente 3 hasta 10 Angstroms. Se emplea en diversas aplicaciones como el secado, la separación de hidrocarburos y mezclas, entre otras.

Figura4. Zeolitas tipo tamiz



Fuente: TME tamices moleculares

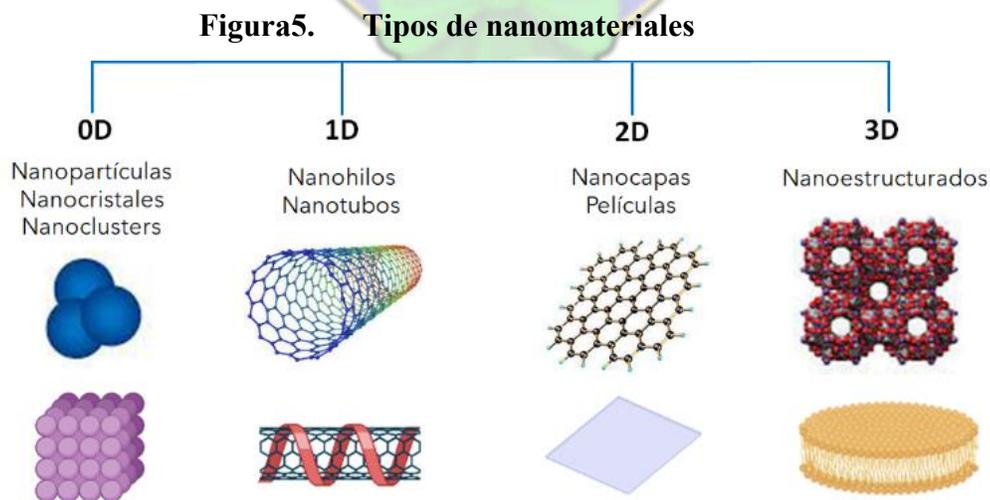
2.3.5. Polímeros o resinas sintéticas

Se fabrican polímeros mediante la polimerización de dos tipos principales de monómeros. Aquellos derivados de compuestos aromáticos, como el estireno y el divinilbenceno, se emplean para adsorber compuestos orgánicos no polares presentes en soluciones acuosas.

Por otro lado, los monómeros que provienen de esteres acrílicos se utilizan para la adsorción de solutos más polares en soluciones acuosas.

2.3.6. Nano partículas

Una nano partícula es una partícula del tamaño reducido que presenta comportamientos únicos en propiedades y transporte. Los nano materiales pueden clasificarse según su tamaño: **dimensión cero** con diámetro menor a 100nm(nano partículas, nano cristales y nanoclusters), **mono dimensionales** tienen un tamaño que va desde 1 a 100 nm (estructuras cristalinas como nano hilos o nano cables se destacan por sus propiedades semiconductoras), **Bidimensionales** solo una de sus dimensiones se encuentra en la nano escala con 1-100 nm de espesor (grafeno que se destaca por su propiedad de conducción) y las **tridimensionales** materiales cuya estructura interna está formada por nano estructuras más pequeñas o que su tamaño sea cercano a 100nm. (Estrada, Garcias, Perez, & Cantu, 2023)



Fuente. (Estrada, Garcias, Perez, & Cantu, 2023)

Estas nanopartículas pueden dispersarse en medios gaseosos, líquidos o sólidos y debido a su tamaño diminuto, exhiben propiedades únicas que las diferencian de las partículas a mayor escala. Las nanopartículas bimetálicas son partículas diminutas que están compuestas por dos diferentes elementos metálicos. Estas partículas suelen tener tamaño que varía entre 1 a 100 nanómetros (Gomez, 2020).

2.4. NANOTECNOLOGIA

La nanotecnología es un campo de investigación que se centra en el estudio, diseño y fabricación de materiales a escala nanométrica, con una amplia variedad de aplicaciones y usos. La combinación de dos metales en una sola nanopartícula puede resultar en propiedades mejoradas en comparación con las nanopartículas que contienen solo un metal (Tapia & Zanella, 2020).

Estas propiedades mejoradas pueden incluir características electrónicas, magnéticas y ópticas superiores, así como un mejor desempeño en procesos catalíticos o foto catalíticos (Gomez, 2020).

2.4.1. Síntesis de Nanopartículas

Las nanopartículas metálicas pueden obtenerse principalmente mediante dos métodos:

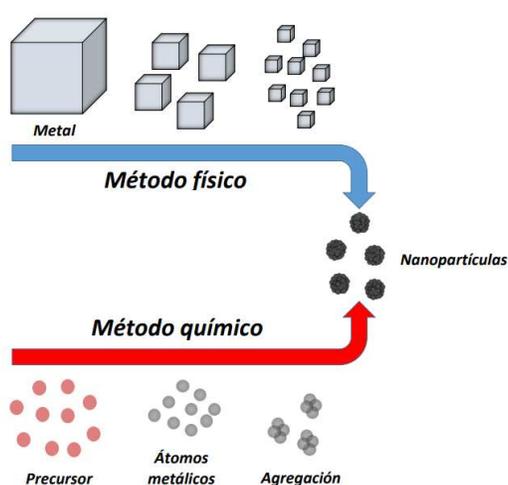
- **Método Físico (top-Down)**

Implica la subdivisión mecánica del metal.

- **Método Químico (Bottom-Up)**

Se base en la nucleación y crecimiento de partículas a partir de átomos metálicos, este método representa ventajas significativas en términos de control de tamaño y reproductividad de las nanopartículas.

Figura6. Métodos de síntesis de Nanopartículas metálicas



Fuente: (Gomez, 2020)

A continuación, se muestran los métodos más importantes de síntesis de nanopartículas según (Gomez, 2020).

- **Reducción química de una sal metálica**

Consiste en la reducción química de sales metálicas utilizando agentes reductores, en presencia de estabilizantes para prevenir la agregación de las nanopartículas.

Este proceso es efectivo para la producción de nanopartículas mono o bimetálicas, así como los óxidos metálicos. Generalmente se emplean precursores metálicos en forma de sales que contienen el ion deseado y agentes reductores como el borohidruro de sodio o la hidracina (Jamkhandea, Ghule, Bamer, & Kalaskard, 2019). El método permite obtener nanopartículas con distribuciones de tamaño relevantemente estrechas y el tamaño medio de las partículas se puede ajustar variando la proporción entre la nucleación y el crecimiento. Dado que las nanopartículas tienen una alta energía superficial, suelen ser estabilizadas con agentes protectores como polímeros, ligantes de coordinación o surfactantes, para prevenir la agregación durante la preparación, aplicación y almacenamiento (López, y otros, 2013).

Para evitar la aglomeración de nanopartículas, se emplea una matriz de soporte durante su formación, resultando en lo que se denomina composito. Esto no solo previene la aglomeración, sino que también permite obtener efectos sinérgicos que mejoran las propiedades del composito o nanocomposito resultante. La síntesis mediante el método de reducción se realiza en dos etapas principales. Primero, los iones metálicos se adsorben en la superficie del soporte, matriz o material poroso. Luego, se ajusta la mezcla a un pH específico y se añade una solución del agente reductor elegido (Sanchez C. E., 2021).

Según (López, y otros, 2013), para sintetizar nanopartículas en un sistema bimetálico Fe-Cu, se emplea la reducción de sales precursoras utilizando borohidruro de sodio como agente reductor. Para lograr nanopartículas lo más pequeñas posible, es crucial añadir rápidamente el agente reductor. La reacción estequiométrica es la siguiente:



Para obtener nanopartículas covalentes de Fe y Cu, la síntesis se realiza en una atmósfera de nitrógeno para evitar la oxidación. Si no se controla la atmósfera, se forman óxidos de hierro y cobre. En aplicaciones medioambientales, es preferible utilizar estos metales en forma de óxidos, ya que la oxidación es inevitable en presencia de agua. Además, los óxidos bimetálicos pueden ser

igualmente efectivos para la remoción de contaminantes, eliminando la necesidad de un control estricto de la atmósfera durante la síntesis.

Un compuesto formado por un sistema bimetálico de Cu y Fe soportado en carbón activado y sintetizado mediante reducción con borohidruro de sodio, presenta una morfología rugosa con pequeños poros que albergan partículas casi esféricas de aproximadamente 20 nm, algunas de las cuales están dispuestas en cadena. El análisis por difracción de rayos X (DRX) reveló la presencia de Fe_3O_4 y Cu_2O . Este compuesto demostró ser eficaz en la adsorción del compuesto orgánico azul índigo, aprovechando su alta área superficial y facilitando la remoción del contaminante a través de un proceso de oxidación (Trujillo Reyes, Sánchez Mendieta, Colín Cruz, & Morales Luckie, 2010).

- **Descomposición térmica, fotoquímica o sonoquímica**

Consiste en la descomposición de compuestos organometálicos mediante la acción de calor, luz o fenómenos de cavitación acústica, lo que da lugar al elemento cerovalente correspondientes y por ende a las partículas, que son protegidas por un estabilizante.

- **Síntesis por deposición química de vapor**

El método consiste en la evaporación de precursores metálicos y la posterior reacción o descomposición para dar lugar a los coloides metálicos sobre un sustrato.

- **Síntesis Electroquímica**

Este método utiliza un ánodo de sacrificio como fuente de átomos metálicos, adecuado para metales fácilmente oxidables como cobre o níquel. Durante el proceso, el ánodo se oxida en presencia de una sal de amonio cuaternario, que actúa como electrolito y estabilizante. Los cationes metálicos generados se dirigen hacia el cátodo, donde son reducidos para formar átomos que, a su vez, constituyen las nanopartículas.

Los nanomateriales con propiedades morfológicas, ayudan a resolver los sistemas actuales de tratamiento de las aguas, potabilización, desalación, desinfección, depuración entre otros. Gracias a su gran área superficial, los nanomateriales permiten retener una mayor cantidad de contaminantes que los adsorbentes convencionales. Nanomateriales como las nanopartículas de dióxido de titanio, plata, nanotubos de carbono, exhiben una actividad antimicrobiana superior a la de los desinfectantes convencionales, lo que les permite eliminar eficazmente los microorganismos no deseados presentes en el agua. Además, varios nanomateriales han demostrado una gran capacidad de adsorción para eliminar metales pesados, aceites, solventes

orgánicos y contaminantes emergentes del agua, incluso aquellos que a menudo escapan a los sistemas de tratamiento actuales.

2.4.2. Composito y Nanocomposito

2.4.2.1. Composito

Es un material compuesto por dos o más fases distintas que se combinan para obtener propiedades mejoradas en comparación con los materiales individuales. Las fases típicas de un composito incluyen una matriz (que puede ser polimérica, metálica, cerámica, etc.) y un refuerzo (que puede ser en forma de fibras, partículas, etc.). Los compositos se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones industriales debido a su resistencia, durabilidad y bajo peso (Callister & Rethwisch, 2020).

La adsorción se ha investigado extensamente como técnica para la remoción de metales pesados, y actualmente se exploran adsorbentes no convencionales en busca de materiales más eficientes y económicos (Trujillo Reyes et al., 2010). En este contexto, se han desarrollado compositos utilizando residuos agroindustriales como matriz. Estos residuos, cuando no se manejan adecuadamente, pueden generar problemas ambientales, pero su contenido en compuestos químicos (como azúcares, pigmentos, fibra alimentaria, proteína, polifenoles, lignina, celulosa y hemicelulosa, etc.) los hace atractivos para su transformación en productos de alto valor mediante tratamientos físicos, químicos o microbiológicos (Barragán et al., 2008).

La remoción de metales pesados mediante compositos puede ocurrir a través de diversos mecanismos, como el intercambio iónico, la atracción electrostática y las reacciones de oxidación-reducción (Liu et al., 2020).

2.4.2.2. Nanocomposito

Es un tipo específico de composito en el que al menos una de las fases tiene dimensiones en la escala nanométrica (menos de 100 nanómetros). Esto significa que las partículas, fibras o láminas utilizadas como refuerzo tienen tamaños en el rango de los nanómetros. Los nanocompósitos ofrecen propiedades únicas, como una mayor resistencia mecánica, conductividad eléctrica, barrera a gases, entre otras, debido a la alta superficie específica y la interacción a nivel molecular entre las fases (Hussain, Okamoto, & Russell, 2006).

Las ventajas y desventajas asociadas con el uso de nanocompositos se resumen en la Tabla 1.

Tabla1. Ventajas y desventajas de Nanocomposito

Ventajas	Referencia	Desventajas	Referencia
Mayor área de superficie para reacciones o adsorción de contaminantes, mejorando la eficiencia en aplicaciones como la remediación ambiental.	(M.R.Khedher, 2019)	Los procesos de síntesis y fabricación de nanopartículas pueden ser costosos.	(P.H.Chiu, 2017)
Mejora en características específicas como conductividad, resistencia a la corrosión y capacidad de adsorción	(S.H.Kim, 2020)	Desafíos en la producción a gran escala y la integración en procesos industriales	(J.J.Kim, 2016)
Reducción en costos operativos al mejorar la eficiencia del proceso de tratamiento	(R.K.Sinha, 2019)	Las nanopartículas pueden aglomerarse, afectando la eficacia y las propiedades del nanocompuesto.	(Sanchez M. , 2020)
Personalización de materiales para aplicaciones específicas mediante ajuste de propiedades.	(A.K.Jha, 2019)		

Fuente: Elaboración propia

2.4.2.3. Aplicaciones de Nanocompositos

- **Dispositivos electrónicos:** En la nanoelectrónica, los nanocompuestos se emplean para mejorar la conductividad eléctrica y térmica de materiales utilizados en dispositivos como transistores y circuitos integrados (García, 2023).
- **Envases y empaques:** Los nanocompuestos se utilizan en la fabricación de envases que mejoran la barrera al oxígeno y la humedad, prolongando la vida útil de los productos alimenticios. Además, algunos nanocompuestos tienen propiedades antimicrobianas que ayudan a prevenir el crecimiento de bacterias en los alimentos (Ojeda, Arias, & Sgroppo, 2020).
- **Industria Automotriz:** Se aplican en componentes de vehículos para mejorar la resistencia y reducir el peso.

- **Materiales Biomédicos:** Se utilizan en la fabricación de implantes y dispositivos médicos debido a su biocompatibilidad y propiedades mecánicas mejoradas (Navarro & Lopez, 2023).
- **Textiles Inteligentes:** Los nanocompuestos se aplican en la producción de tejidos que pueden ser resistentes al agua, a las manchas o incluso tener propiedades antimicrobianas, lo que los hace ideales para ropa deportiva y médica (García, 2023).
- **Materiales de construcción:** Se emplean en la producción de materiales compuestos más ligeros y resistentes, como paneles aislantes y hormigones mejorados, que ofrecen mayor durabilidad y eficiencia energética (Navarro & Lopez, 2023).

2.4.2.4. Aplicación de Nanocomposito en la Remediación Medio Ambiental

Los nanocompositos han demostrado ser herramientas altamente eficaces en la remediación ambiental, ofreciendo soluciones innovadoras para tratar diversos tipos de contaminantes. Algunas de sus aplicaciones más destacadas se muestran en la tabla 2.

Tabla2. Aplicaciones de las Nanocompositos

Aplicación	Referencia
Los nanocompositos de óxidos metálicos (como Fe_3O_4 , TiO_2) dispersos en matrices poliméricas o carbonosas son eficaces en la adsorción de metales pesados como el plomo (Pb), cadmio (Cd), y mercurio (Hg) de aguas contaminadas.	(Liu X. , 2016)
Los nanocompositos basados en TiO_2 son utilizados en la fotocatalisis para degradar contaminantes orgánicos persistentes, como pesticidas y compuestos farmacéuticos en aguas residuales.	(Herrmann, 2005)
Los nanocompositos de carbono, como los nanotubos de carbono funcionalizados, se utilizan para adsorber y degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) en suelos contaminados.	(Anjum, 2017)
Los nanocompositos de TiO_2 con materiales de soporte como sílice o zeolita son empleados en la fotocatalisis para la degradación de	(Zhang Z. e., 2014)

contaminantes gaseosos como el NO_x y VOCs (compuestos orgánicos volátiles).	
Nanocompositos de nanopartículas metálicas (como Ag, ZnO) en matrices poliméricas son efectivos en la eliminación de colorantes y pigmentos tóxicos de aguas residuales industriales.	(Sinha, 2015)

Fuente: Elaboración propia

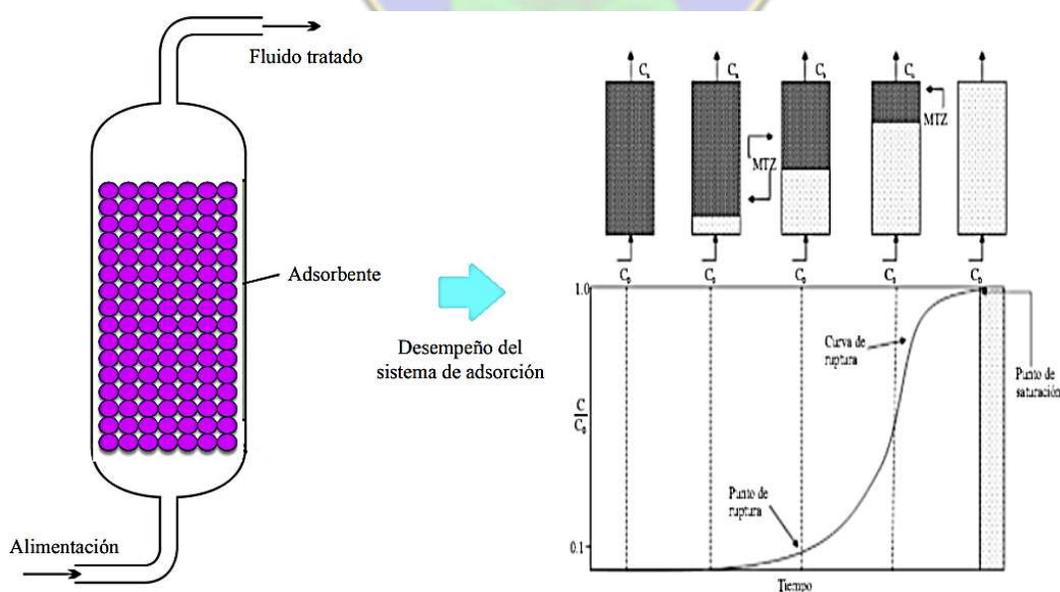
2.6. TIPOS DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN

Los equipos más comunes son:

2.5.1. Columnas de lecho fijo

Las columnas de adsorción de lecho fijo, son equipos diseñados para llevar a cabo un proceso de separación conocido como adsorción. Estas torres están construidas con el propósito de contener partículas de un adsorbente específico en su interior sin movimiento y compacto. En este proceso, un fluido que requiere tratamiento entra en contacto con las partículas sólidas del adsorbente dentro de la torre. Aquí las moléculas del soluto que son afines al adsorbente son retenidas por este último, mientras que el resto del fluido sale purificado de dicho compuesto. (Bernal & Aguirre, 2022)

Figura7. Columna de Adsorción de lecho fijo



Fuente: Elaboración Propia

Este tipo de sistemas se requiere el empleo de una o más columnas de funcionamiento intermitente para que el sistema opere en continuo, estas pueden trabajar con flujo descendente en serie o flujo ascendente en paralelo.

A nivel operativo, una columna de lecho fijo presenta un tiempo de trabajo específico para la adsorción de contaminantes, asegurando que la salida del efluente cumpla con los niveles de concentración permitidos. Este periodo de operación se puede visualizar mediante la curva de avance, cuyo comportamiento se muestra en la Figura 6.

Como se muestra en la Figura 6, inicialmente el adsorbente está libre de adsorbato. El flujo de alimentación que contiene el contaminante (fluido a tratar) ingresa por la parte inferior de la columna y el fluido tratado (corriente de salida) es el efluente purificado al pasar a través del lecho adsorbente. C/C_0 representa la relación entre la concentración del contaminante en el efluente (C) y la concentración inicial en la alimentación (C_0), (t) representa el tiempo durante el cual el sistema de adsorción está en operación.

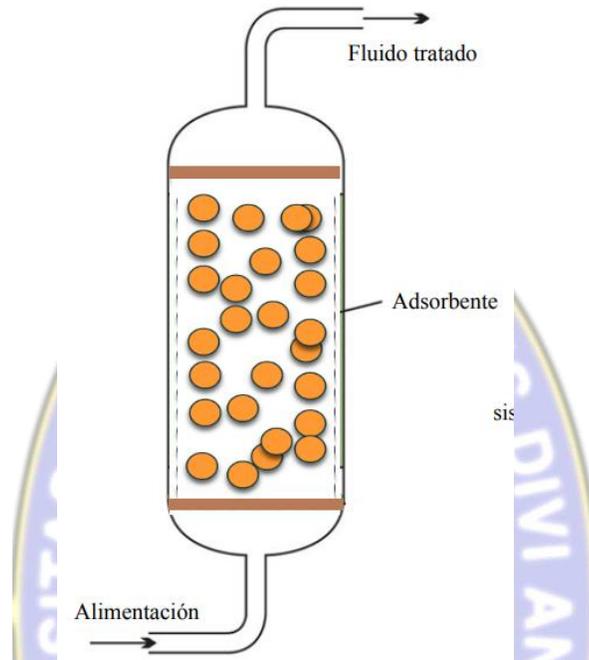
En la curva de saturación se muestra la evolución de la relación C/C_0 en función del tiempo. Inicialmente, el adsorbente captura el contaminante de manera eficiente, manteniendo la concentración de salida baja ($C/C_0 \approx 0$) así se puede observar dos puntos importantes:

- **Punto de ruptura:** indica el momento en el que la concentración del contaminante en el efluente comienza a aumentar significativamente, alcanzando una fracción específica de la concentración inicial (generalmente 0.1 a 10%).
- **Punto de saturación:** El sistema llega a un punto donde el adsorbente ya no puede capturar más contaminante y la concentración de salida se aproxima a la concentración de entrada ($C/C_0 \approx 1$)

2.5.2. Columnas de lecho móvil

Son equipos que, involucra la suspensión de partículas sólidas en un estado similar al de un fluido, esto crea partículas que están en constante movimiento y tienen las propiedades tanto de un líquido como de un gas mayormente utilizado en sistemas solido-gas. Los lechos móviles son utilizados comúnmente en procesos industriales como la producción química, la refinación de petróleo y la generación de energía. (Textos Científicos, 2006)

Figura8. Columna de lecho móvil



Fuente: Elaboración propia

2.6. DISEÑO Y MODELACIÓN DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN DE LECHO FIJO

El diseño de columnas de adsorción de lecho fijo mediante modelos matemáticos permite conocer variables de diseño como la concentración del soluto final de la adsorción, el tiempo necesario para llevar a cabo la operación, la cantidad de adsorbente, altura del lecho.

La formulación de un modelo requiere de los datos de equilibrio, las expresiones de velocidad de adsorción, los balances y condiciones de frontera.

En la descripción de la operación de adsorción en la columna se utilizan graficas de la variación del soluto en la salida de la columna con el tiempo. Estas graficas son llamadas curvas de ruptura. La forma particular que toma la curva de ruptura depende tanto del tipo de equilibrio del sistema del que se trate como los mecanismos de transporte.

2.6.1. Criterios de Diseño de Columnas de Adsorción

El diseño de columnas de adsorción de lecho fijo sigue criterios fundamentales. En primer lugar, se realiza un estudio en batch para caracterizar la capacidad de adsorción del material adsorbente, lo que permite entender su rendimiento en condiciones controladas. Con estos resultados, se procede a diseñar la columna de adsorción, optimizando tanto la eficiencia del proceso de

adsorción como los parámetros operativos. A continuación, se exponen algunos de los criterios esenciales para la selección del material adsorbente y el diseño de las columnas de adsorción.

2.6.1.1. Selección del material Adsorbente

La selección del material adsorbente adecuado está en función de la sustancia que se desea eliminar, factores como la afinidad, capacidad de adsorción y regeneración influyen en esta elección (Gupta, 2009)

2.6.1.3. Distribución de Tamaño de partículas

Las partículas del adsorbente deben tener un tamaño uniforme para evitar la formación de canales preferenciales en la columna. Se busca una distribución de tamaños que permita un flujo homogéneo y una mayor eficiencia en el proceso de adsorción (Bernal & Aguirre, 2022).

2.6.1.4. Distribución de poros

La estructura porosa del adsorbente influye en su capacidad de adsorción, ya que determina su área superficial y la accesibilidad de las moléculas al sitio activo. Se busca un equilibrio entre poros grandes, que facilita la difusión de moléculas grandes, y poros pequeños, que son eficaces en la adsorción de moléculas pequeñas (Bañón, 2017). La porosidad de un lecho de material adsorbente suele oscilar entre 0.3 y 0.5 en aplicaciones comunes de adsorción con carbón activado o zeolitas (García, 2021).

2.6.1.6. Consideración de Presión y Temperatura

La presión y la temperatura afectan la capacidad de adsorción y la selectividad,

2.5.1.7. Regeneración y ciclos de Operación

La regeneración se debe realizar periódicamente para eliminar las sustancias adsorbidas, para ello se establecen ciclos de operación que influyen fases de adsorción, desorción y regeneración (Vatavuk, Klotz, & Stallings, 2000).

2.6.1.2. Tamaño y forma de la columna

La relación entre la altura del lecho y el diámetro de la columna es esencial para evitar la formación de zonas muertas y controlar la presión en el sistema. Estos parámetros afectan directamente la velocidad del flujo y la eficiencia del proceso de adsorción. En la Tabla 3, se presentan valores de diámetro y altura de lecho utilizados en otros proyectos de diseño de columnas de adsorción.

Tabla3. Variables para Diseño

Caudal	Diámetro	Altura de lecho	Referencia
16.67mL/s	0.10 m	1.3 m	(Avila, Puello, & Castilla, 2019)
1.045 mL/s	0.12 m	1 m	(Bernal & Aguirre, 2022)
116.67 mL/s	0.09 m	1.5 m	(Jimenez, 2020)
70 mL/s	0.24 m	1 m	(Castello, 2017)
250 mL/s	0.088 m	1.4 m	(Martinez, Pajaro, & Castilla, 2019)

Fuente: Elaboración propia

Los datos sugieren que el diseño de columnas debe adaptarse a las condiciones específicas de operación, como el caudal y la escala del sistema. Los diseñadores deben considerar tanto la relación altura-diámetro como el caudal para optimizar la eficiencia del proceso de adsorción.

2.6.1.5. Velocidad de flujo y Tiempo de contacto

La velocidad de flujo del fluido a través de la columna, que debe oscilar entre 4.9 a 24.6 m/h, es esencial para asegurar un tiempo de contacto adecuado entre el fluido y el adsorbente, lo que permite lograr una adsorción efectiva (Yazdani & Kaghazchi, 2010).

2.6.1.8. Análisis de costos y Eficiencia

Se evalúan los costos de construcción, operación y mantenimiento de la columna, teniendo en cuenta también la eficiencia de adsorción y la vida útil del sistema. (Paiz & Mendez Hernandez, 2021)

2.6.2. Modelación Matemática de Columnas de Adsorción

La modelación matemática es un proceso mediante el cual se utiliza la matemática para representar y comprender fenómenos del mundo real. Implica la formulación de ecuaciones, sistema de ecuaciones o algoritmos que describen el comportamiento de un sistema, proceso o situación. Estos modelos matemáticos pueden ser utilizados para predecir el comportamiento o simular diferentes escenarios.

El principal objetivo del modelado matemático es representar el fenómeno de adsorción en varios escenarios y obtener los parámetros necesarios para el diseño de sistemas prácticos. Estos modelos requieren datos obtenidos tanto a nivel laboratorio como de sistemas en lotes (Weber & Edward, 1987).

Es impredecible elegir el modelo matemático más adecuado que represente con precisión el proceso de adsorción en columnas de lecho fijo. Esto implica la evaluación y selección entre varios modelos teóricos y empíricos desarrollados para este fin.

2.6.2.1. Modelos matemáticos empíricos

La modelación matemática proporciona una descripción cuantitativa de fenómenos utilizando leyes y principios aplicables a las unidades de interés. Se busca obtener modelos que describan el comportamiento individual de estas unidades (Cardenas & Ortega, 2015).

2.6.2.1.1. Modelo BDST

El modelo denominado BDST (Bed Depth Service Time – Tiempo de Servicio de la Altura de Lecho), creado por Hutchins en 1973, se ha empleado para examinar los datos obtenidos en pruebas efectuadas en columnas de adsorción (Castillo, 2001). Se describe mediante la siguiente ecuación:

$$t_B = \left(\frac{N}{U_L * C_0} \right) * Z - \left(\frac{1}{k * C_0} \right) * \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \dots \dots \dots \text{Ec. (1)}$$

Donde:

t_B = tiempo de ruptura

k = constante de velocidad de adsorción $\left(\frac{V_{\text{solucion}}}{m \text{ adsorbato} * \text{tiempo}} \right) \frac{L}{mg * \text{min}}$

C_B = concentración del soluto en el punto de ruptura $\frac{mg}{L}$

N = capacidad de adsorción del lecho $\left(\frac{m \text{ adsorbato}}{V_{\text{solucion}}} \right) \frac{mg}{L}$

Z = altura del lecho **cm**

U_L = velocidad de flujo lineal definida como razón entre el flujo

volumetrico y el área de la sección transversal de la columna $\frac{cm}{min}$ Capacidad de adsorción del

lecho N y la constante de velocidad k , pueden ser determinadas mediante el análisis de la pendiente y la intersección en una gráfica de tiempo de ruptura y la profundidad del lecho, la cual tiende a una línea recta.

Este modelo, predice la relación entre altura de relleno y el tiempo de servicio o ruptura, para una columna de lecho fijo, se basa en admitir que difusión intra particular y transferencia de materia externa son despreciables, asumiendo que el adsorbato se adhiere directamente a la superficie del

adsorbente. Además, se supone que la zona de adsorción se desplaza a una velocidad constante a lo largo de la columna, manteniendo constante la capacidad de adsorción de lecho (Calero, Lara, & Perez, 2018).

El modelo BDST requiere datos experimentales que muestren la variación del tiempo de ruptura en las columnas de diferentes alturas, con la velocidad de flujo y la concentración inicial del sistema mantenidas constantes. Presenta limitaciones al aplicarse a columnas de adsorción con nanopartículas de cobre y hierro, porque que no se cuenta con los datos experimentales de la capacidad de adsorción de lecho de ruptura y así mismo las constantes que requiere dicho modelo.

2.6.2.1.2. Modelo de Wolborska

Este modelo describe la relación para la distribución de concentración en el lecho adsorbente durante la región de baja concentración de la curva de ruptura y esta expresada por la siguiente ecuación:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = \left(\frac{\beta * C_0}{N}\right) * t - \left(\frac{\beta}{U_L}\right) * Z \dots \dots \dots \text{Ec. (2)}$$

Donde:

β = es el coeficiente cinetico de transferencia de masa externo

Z = altura del lecho

t = tiempo de saturacion

C = concentracion de soluto en el tiempo t

U_L = velocidad media del flujo

N y β se calculan a partir de la pendiente y la intersección de la gráfica de $\ln(Y/Y_0)$ en función del tiempo t, con una altura de lecho y una velocidad de fluido conocidas. Se asume que, en la región de baja concentración, la transferencia de masa esta principalmente dominada por la difusión de película externa (Castillo, 2001).

El Modelo de Wolborska presenta limitaciones al aplicarse en columnas de adsorción que utilizan nanopartículas de cobre y hierro, debido a la necesidad de fenómenos de difusión interna, y la capacidad de adsorción no lineal. Además, el tamaño y la alta área superficial de las nanopartículas pueden afectar las tasas de adsorción, lo que podría requerir ajustes o la consideración de modelos alternativos.

2.6.2.2. Modelos Matemáticos Teóricos

2.6.2.2.1. Modelo del lecho no utilizado

Uno de los modelos matemáticos teóricos ampliamente utilizados en el diseño de lechos adsorbentes es el método de longitud de lecho no utilizada (LUB). Este método supone que la transferencia de masa es instantánea y que la adsorbente en lecho empacado está dividido en dos secciones: la sección de equilibrio o saturada y la sección de LUB. Este enfoque permite escalar las torres de adsorción de lecho fijo basándose en la curva de ruptura obtenida bajo condiciones experimentales específicas y en la isoterma de adsorción. Las principales suposiciones de este modelo son:

- El flujo, la temperatura y la concentración de la alimentación permanecen constantes.
- La temperatura, la composición y la velocidad no cambian en dirección radial.
- La zona de transferencia de masa se mantiene estable.
- La retención del adsorbato en los espacios vacíos del adsorbente, es pequeña comparada con la carga del adsorbato de equilibrio.

Para este modelo se toma la longitud total del lecho como la suma de LUB y la longitud del lecho en el equilibrio con la corriente de alimentación.

$$Z = LUB + Z_s \dots \dots \dots \text{Ec. (3)}$$

Donde U se toma como la velocidad de avance del plano de adsorción, a cualquier tiempo, la longitud de lecho saturado se determina con la siguiente ecuación:

$$Z_s = U * t \dots \dots \dots \text{Ec. (4)}$$

En el tiempo de ruptura t_B , la longitud de lecho saturado se calcula con:

$$Z_s = U * t_B \dots \dots \dots \text{Ec. (5)}$$

Reemplazando la Ec. 4 y 5 en Ec.3

$$LUB = Z - Z_s = Z * \left(\frac{t_s - t_B}{t_s} \right) \dots \dots \dots \text{Ec. (6)}$$

El balance de adsorbato para la unidad de adsorción de lecho fijo, se muestra en la siguiente Ecuación:

$$U_L * (Y_o - Y_o^*) * t_{dis} = Z_s * \rho * (X_T - X_o) \dots \dots \dots \text{Ec. (7)}$$

Donde:

X_o = Concentracion inicial de adsorbato en el adsorbente.

Y_o^* = Concentracion en equilibrio con X_o

t_{dis} = tiempo requerido para la operación de la columna

X_0 y Y_0^* = se consideran cero

Una limitación de este método es que se basa en condiciones de estado estacionario, mientras que la naturaleza del proceso es más dinámica, lo que puede afectar su aplicabilidad, además hay restricciones en el diseño que se deben tomar en cuenta.

2.6.2.2.2. Modelo de Michaels

En este modelo se considera la formación de la zona de adsorción (Z_A) en el lecho durante la operación, lo cual está restringido a situaciones donde la isoterma de adsorción es favorable y la operación es aproximadamente isotérmica. El requisito de que la isoterma de adsorción sea favorable conduce a una transferencia de masa rápida y a curvas de ruptura en forma de S (Calero, Lara, & Perez, 2018).

En la zona (Z_A), condiciones permanecen estables con el tiempo, a excepción del momento inicial. En este caso, el tiempo correspondiente a Y_B es el tiempo de ruptura T_B , y el tiempo correspondiente a Y_E es el tiempo de saturación del lecho. Después de que se establece la zona de adsorción, se requiere un tiempo t_A para que su altura se mueva de manera descendente por la columna hasta alcanzar condiciones de estado estable. El tiempo está determinado por:

$$t_A = \frac{V_A}{F} \dots \dots \dots Ec.. (8)$$

Donde:

V_A =volumen de solución necesario para que la zona de adsorción recorra completamente el lecho. El Modelo de Michaelis-Menten presenta limitaciones al aplicarse a columnas de adsorción con nanopartículas de cobre y hierro, ya que está diseñado para describir la cinética de reacciones enzimáticas y asume una relación no lineal entre la tasa de adsorción y la concentración del adsorbato, lo que puede no reflejar la complejidad de la adsorción en nanopartículas. Además, no considera la posible heterogeneidad de las nanopartículas.

2.7. EL AREA DE ESTUDIO EN EL PRESENTE PROYECTO DE GRADO

2.7.1. La Minería en Bolivia

La minería en Bolivia tiene profundas raíces que se remontan a los tiempos precoloniales. Antes de la llegada de los españoles, las civilizaciones indígenas, como los incas, ya extraían minerales preciosos como el oro y la plata de las montañas bolivianas. (Alberto, 2023)

A lo largo de su historia, Bolivia ha sido un importante productor de minerales. Durante el periodo colonial, Potosí se convirtió en uno de los centros mineros más ricos del mundo debido a sus abundantes vetas de plata. La explotación de estas minas fue fundamental para la economía boliviana y atrajo a miles de trabajadores y aventureros. Sin embargo, con el tiempo la minería enfrentó desafíos. La caída de los precios internacionales de la plata y los altos costos de producción llevaron a un declive en la actividad minera. (Díaz, 2012)

Hoy en día, Bolivia sigue siendo un productor significativo de minerales. Los departamentos occidentales, como Potosí, La Paz y Oruro, albergan importantes yacimientos de estaño, plata, cobre, tungsteno, antimonio y zinc. (Carlos, 2023)

Según datos del INE, Bolivia es un importante productor de minerales como el zinc, plomo, estaño, oro y otros. Estas cantidades extraídas han mantenido una media estable, lo que ha posicionado al país como un destacado proveedor regional y global. Sin embargo, esta posición también implica una responsabilidad en la degradación del medio ambiente y ha tenido efectos irreparables en la vida de los seres vivos.

Tabla4. Minerales extraídos

Extracción por año en toneladas métricas			
Mineral	2021	2022	Marzo 2023
Zinc	499536,47	518480,45	117876,44
Plomo	93246,34	90115,39	22489,76
Estaño	19668,69	17556,66	4153,83
Oro	4515,63	4490,90	987,78
Antimonio	3309,91	3453,43	973,10
Cobre	3093,14	3608,19	912,00
Wólfram	1970,78	1712,77	409,60
plata	1292,19	1219,04	298,70
Cadmio	0	0	0

Fuente: Producción nacional de minerales por tipo de mineral INE

2.7.2. Minería en Milluni

Milluni fue una importante zona minera con la mina del mismo nombre iniciando operaciones en 1920 bajo la empresa 'Fabulosa Mines Consolidated', llegando a ser una de las más importantes minas de estaño en Bolivia. Operada por COMSUR desde 1976 hasta su cierre en 1986,

actualmente la mina se considera abandonada, aunque sigue siendo explotada por cooperativas locales. (Campanini, 2017).

Milluni, ubicada a 30 km al norte de La paz, se sitúa entre 4500 y 4700 m sobre el nivel del mar, pertenece a la provincia Murillo, en el distrito 13 del municipio de El Alto, donde se encuentran comunidades como Milluni Alto, El ingenio, Bajo Milluni y Wila Sirka. En esta área se ubican el observatorio sismológico de San Calixto, Albergues turísticos y un retén policial. (Miranda, Arancibia, & Quispe, 2010)

Figura9. Panorámica de Milluni



Fuente: (Miranda, Arancibia, & Quispe, 2010)

2.7.3. Lagunas de Milluni

Las lagunas de Milluni, son conocidas por su belleza natural y su entorno montañoso impresionante, entre las más destacadas se describe a continuación:

- **Laguna Pata Khota:** Se encuentra a 4665 m sobre el nivel del mar, en las coordenadas de $16^{\circ}17'53''S$ y $68^{\circ}08'00''O$, presenta una forma circular, con una superficie de 17.7 hectáreas y una profundidad máxima de 11 m. Sus principales fuentes de agua provienen del glaciar Huayna Potosí situado al noroeste.

Figura10. Laguna Pata Khota



Fuente: mapcarta.com

- **Lagunas Jankho Khota:** Se encuentra debajo de la laguna Pata Khota a una altitud de 4664 m sobre el nivel del mar, en las coordenadas de 16°18'42''S y 68°08'48''O, de forma alargada, con una superficie de 56,7 hm² y profundidad máxima de 9m. Las fuentes de agua de esta laguna son variables, los cursos de agua que la alimentan varían frecuentemente según la estación del año y las condiciones climáticas, recibe afluentes de la laguna Pata Khota.

Figura11. Laguna Jankho Khota



Fuente: mapcarta.com

- **Laguna Milluni Chico:** Se encuentra debajo de la laguna Jankho Khota a una altitud de 4600 m sobre el nivel del mar en las coordenadas 16°20'34''S y 68°09'41''O, superficie mayor a 2,69 hm², acumula una enorme cantidad de desechos de la mina Milluni, convirtiéndose en un sedimentador artificial, con una baja capacidad de embalse de agua. Sus principales fuentes de agua son la Jankho Khota y Ventanani.

Figura12. Laguna Milluni Chico



Fuente: mapcarta.com

- **Laguna Milluni Grande:** Se encuentra a la salida del valle de Milluni a una altitud de 4552 m sobre el nivel del mar, con coordenadas de 16°21'32''S y 68°10'02''O, con una superficie de 143.86 hm² y una profundidad máxima de 8.6 m. La laguna recibe los desechos sedimentarios de la laguna Milluni Chico, sus otras fuentes de agua provienen de la rivera izquierda del valle, los cursos de agua se encuentran en contacto con muchas actividades mineras pequeñas que explotan artesanalmente la casiterita (SnO₂). Esta laguna también se alimenta por un curso de agua permanente que nace en la laguna Chulumani, las otras fuentes de agua permanentes son de origen subterráneo, esta laguna al igual que Milluni chico presentan coloración rojiza-naranja misma que es característica de agua contaminada con DAM.

Figura13. Laguna Milluni Grande



Fuente: mapcarta.com

2.7.4. Milluni como Pasivo Ambiental

La región de Milluni en La Paz, Bolivia, ha sido durante mucho tiempo una fuente vital de agua potable para la ciudad. Sin embargo, a lo largo de los 66 años de operaciones mineras en la mina Milluni, se ha convertido también en un problema ambiental debido a la generación de aguas acidas. (Miranda, Arancibia, & Quispe, 2010)

Según el informe de auditoría sobre contaminación hídrica en la cuenca del río Katari y la Bahía de Cohana realizado por la Contraloría General del estado en 2014, se destacan varios puntos importantes relacionados con los pasivos ambientales de Milluni.

- En 1998, COMSUR presento la auditoría Ambiental de Línea Base (ALBA) para la mina Milluni, que identifico la presencia de depósitos de colas en el área inundable del valle con un volumen de 1693000m³ y desmontes de roca esteril con un volumen aproximado de 175000 m³.
- El río Seque se origina en la represa de Milluni, siendo las aguas de la represa la principal fuente de alimentación de este cuerpo de agua, especialmente durante la época de lluvias (GENERAL, 2014)

Figura14. Mapa ubicación de pasivos Ambientales en la región de Milluni



Fuente: Contraloría General del Estado,2014)

En el mapa se exhibe las acumulaciones de residuos mineros y las áreas de excavación abandonadas en la mina de Milluni, identificándolas como pasivos ambientales. Además, muestra las zonas de la región designadas para la explotación minera.

Cuando la mina de Milluni cerró sus operaciones, los niveles de agua subterránea dentro de la mina empezaron a elevarse, llegando eventualmente al nivel del socavón Milluni. (Campanini G., 2017). La interacción entre el agua y el oxígeno en los desechos minero provocó la formación de drenaje ácido de mina.

Un estudio del CEDIB realizado por Campanini en 2017 examinó la región de Milluni y su relevancia como fuente de agua potable para La Paz, se destacaron los siguientes hallazgos:

- La Mina de Milluni procesaba mensualmente 9000 ton de mineral bruto, generando más de un millón de metros cúbicos de relaves y desechos, que aún hoy producen aguas ácidas vertidas en el embalse de Milluni chico y Grande.
- Las aguas ácidas de Milluni se pretratan con cal en la estación **La Calera**, precipitando los metales pesados disueltos antes de ser potabilizadas en la planta de Achachicala, que abastece de agua potable a La Paz.
- La Planta de Achachicala trata principalmente el agua de las represas Milluni y Jankho Khota (81%) y en menor medida del río Choque yapú (19%). Este proceso genera una cantidad significativa de lodos químicamente inestables, que se sedimentan y se vierten en el río Kantutani y la cuenca del choque yapú, generando un impacto Ambiental. Se utilizan aproximadamente 12 TM de cal por día y se generan alrededor de 134.78 toneladas diariamente.

Tabla 5. Metales pesados presentes en drenaje ácido de mina de socavones de Mina de Milluni

Metal	DAM (Época húmeda) [mg/L]	DAM (Época seca) [mg/L]	LIMITE MAXIMO de descarga en cuerpos de agua clase D [mg/L]	Estimado de DESCARGA ANUAL [Ton/año]
As	<0.002	1.67	1.0	5.27
Cd	0.91	0.045	0.3	0.14
Cu	2.54	0.852	1.0	2.69
Mn	-	32.7	-	-
Fe	296.63	576.1	1.0	1876.79

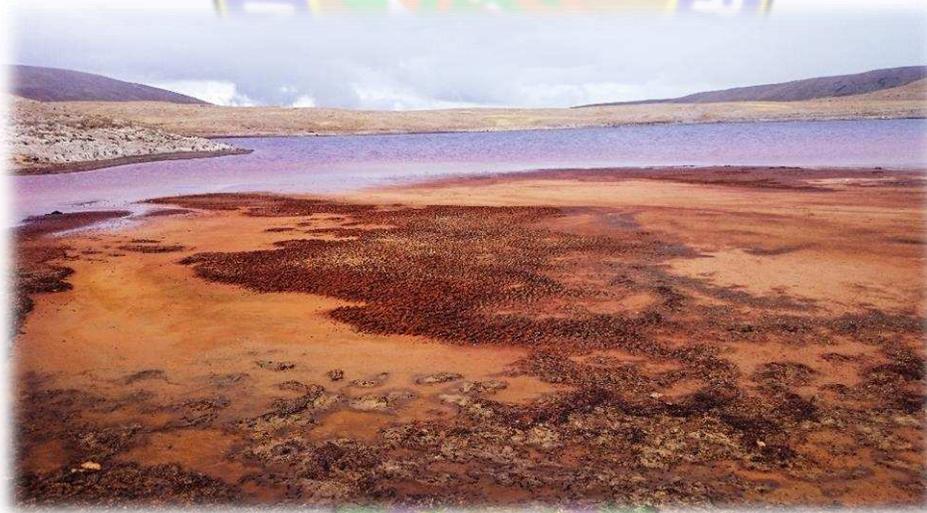
Sb	-	<0.4	1.0	1.26
Pb	<0.03	0.41	0.6	1.29
Zn	190.88	154.2	3.0	486.29

Fuente: (Campanini G., 2017)

2.7.5. Drenajes Ácidos de Mina (DAM)

Los drenajes ácidos de mina (DAM), también conocidos como AMD (siglas en inglés), son efluentes generados por la actividad minera. Estos se forman cuando minerales sulfurados como la pirita se exponen a la intemperie, al agua y a bacterias, produciendo ácido sulfúrico y óxido de hierro. Estos efluentes contaminan fuentes de agua superficiales y subterráneas, presentan un pH bajo debido al ácido sulfúrico (Portillo M. E., 2017). Los Drenajes ácidos de mina generan sedimentos sobre la superficie de color rojo-naranja debido a precipitados de hierro, como se muestra a continuación:

Figura15. Formación de óxido férrico sobre la superficie



Fuente: (Portillo M. E., 2017)

Los drenajes ácidos de mina, además de tener un pH bajo, contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión con altos niveles de sulfatos y metales como Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd y Ni, llegando a concentraciones de varios cientos de miligramos por litro. Estas elevadas concentraciones son perjudiciales para la actividad biológica, contaminan los cursos de agua y pueden dañar las estructuras construidas por el ser humano. (Aduviri, 2006)

Teniendo en cuenta el pH del drenaje y los contenidos de metales o especies minerales presentes en el mismo, este se clasifica en cuatro grupos, las cuales se muestran en la Tabla 6.

Tabla6. Tipos de drenaje acido de Mina

TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V
pH < 4.5	pH < 6	pH > 6	pH > 6	pH > 6
Descripción				
Alta concentración de Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, y otros metales	Alta cantidad de sólidos disueltos.	Moderada a alta cantidad de sólidos disueltos.	Alta cantidad de partículas disueltas.	Agua del drenaje es neutralizado
Alto contenido de oxígeno.	Alta concentración de ion ferroso (Fe+2) y Mn.	Bajo a moderado contenido de ion ferroso (Fe+2) y Mn.	Drenaje neutralizado, pero aún no se fijan los hidróxidos en el agua.	Alta cantidad de sólidos disueltos.
Muy ácido.	Bajo contenido de oxígeno.	Alta alcalinidad		Gran cantidad de hidróxidos precipitados
	Por oxidación, el pH del agua baja drásticamente hasta convertirse en tipo I.			Cationes restantes son disueltos por Ca y Mn.
				Oxi-aniones solubles como bicarbonato

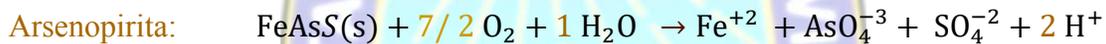
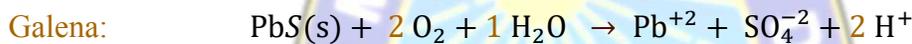
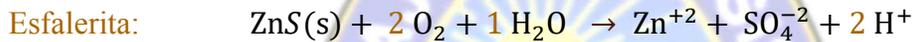
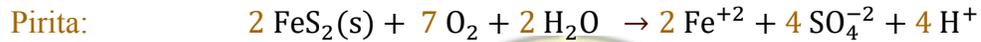
Fuente: (Aduviri, 2006)

2.7.6. Reacciones Químicas de Formación de Drenajes Ácidos de Mina

Las reacciones químicas que conducen a la formación de drenajes ácidos de mina involucran principalmente la oxidación de minerales sulfurados presentes en los depósitos mineros. Estos minerales, cuando se exponen al aire y al agua, reaccionan para formar ácido sulfúrico, lo que a su vez libera metales pesados y causa la acidificación del agua. Los minerales más comunes que causan DAM son: Pirita (FeS_2), Calcopirita (CuFeS_2), Esfalerita (ZnS), Galena (PbS) y Arsenopirita (FeAsS) (Aduviri, 2006).

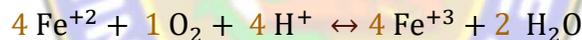
2.7.7. Oxidación de Minerales Sulfurados

Los minerales sulfurados reaccionan con el oxígeno atmosférico y el agua para formar sulfato (SO_4^{-2}), iones metálicos (M^{+2}) y protones (H^{+1}). (Portillo M. E., 2017)



2.7.8. Oxidación de los iones Ferrosos

Los iones ferrosos (Fe^{+2}) se oxidan aún más en presencia de oxígeno y ácido para formar iones férricos (Fe^{+3}) y agua.



Estas reacciones liberan protones (H^{+1}) y generan ácido sulfúrico (H_2SO_4) en el agua, lo que resulta en la acidificación del medio ambiente. Además, los iones férricos pueden precipitar como hidróxidos de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_3$ u óxidos de Hierro (Fe_2O_3), dando lugar a los sedimentos rojo-naranja característicos observados en los drenajes ácidos de mina. (Aduviri, 2006)

2.8. TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO DE DAM

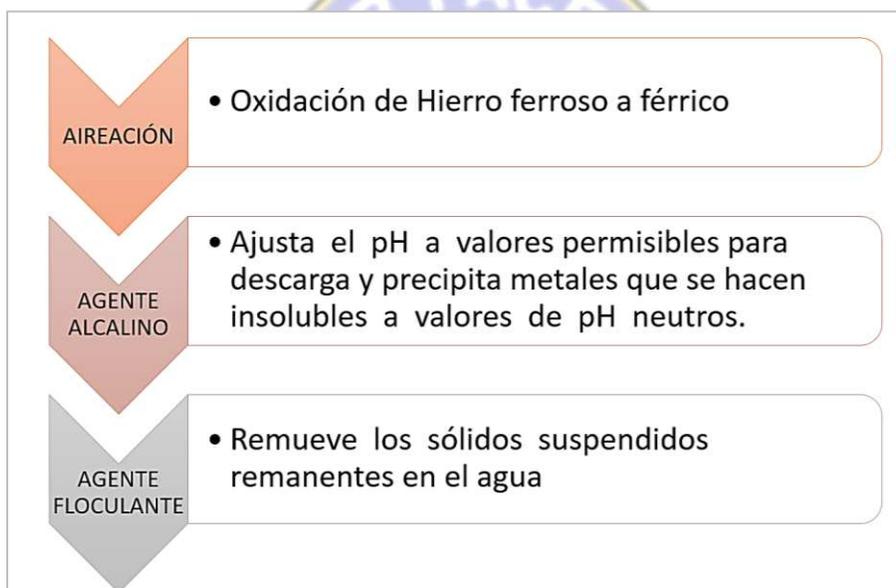
Para el tratamiento de drenajes ácidos de mina, existen diversas tecnologías, todas con el objetivo común de reducir la acidez, disminuir la concentración de sulfatos, precipitar metales pesados y eliminar otras sustancias contaminantes. (Chaparro, 2015), clasifica los sistemas de tratamiento de DAM en dos grupos: tratamientos pasivos y activos.

2.8.1. Tratamientos activos

Este tipo de tratamiento se caracterizan en la neutralización-precipitación, con cal, el intercambio iónico, tecnología por membranas, tratamiento con de reducción con microorganismo sulfato-reductoras y la electrolisis (Ing. Zamorra, 2022). Para neutralizar el pH, se añaden sustancias

básicas como carbonato de calcio, cal hidratada, sosa cáustica, entre otras. Los tratamientos deben aplicarse de manera continua, lo que implica un costo elevado, además de requerir un control, energía y mantenimiento constante de las instalaciones de aireación y mezclado. También se necesita un almacén para los lodos generados durante el proceso (Aduviri, 2006).

Figura16. Etapas de tratamiento convencional



Fuente: (Portillo M. E., 2017)

Las ventajas del tratamiento activo incluyen su implementación en plantas de funcionamiento sencillo, eficiencia para tratar aguas muy ácidas, independencia frente a fluctuaciones de temperatura y la producción de agua de buena calidad apta para descargarse a otras fuentes. Sin embargo, la principal desventaja destacada es la generación de lodos complejos e inestables, que requieren métodos especiales y con costos tanto para su tratamiento como para su disposición (Salazar, et.al. 2012).

2.8.2. Tratamientos Pasivos

Las técnicas de tratamiento pasivo suelen utilizar piedra caliza (CaCO_3) con o sin sustancias orgánicas para controlar tanto la acidez, como la reducción de sulfato a sulfuro y permitir la precipitación de los metales pesados disueltos. Aunque se trata de métodos de bajo costo y sostenible, la principal desventaja es la ineficacia cuando los valores de pH del DAM son inferiores a 2 y los caudales superiores a 50L/s. Por otra parte, los pH del efluente de descarga de los métodos

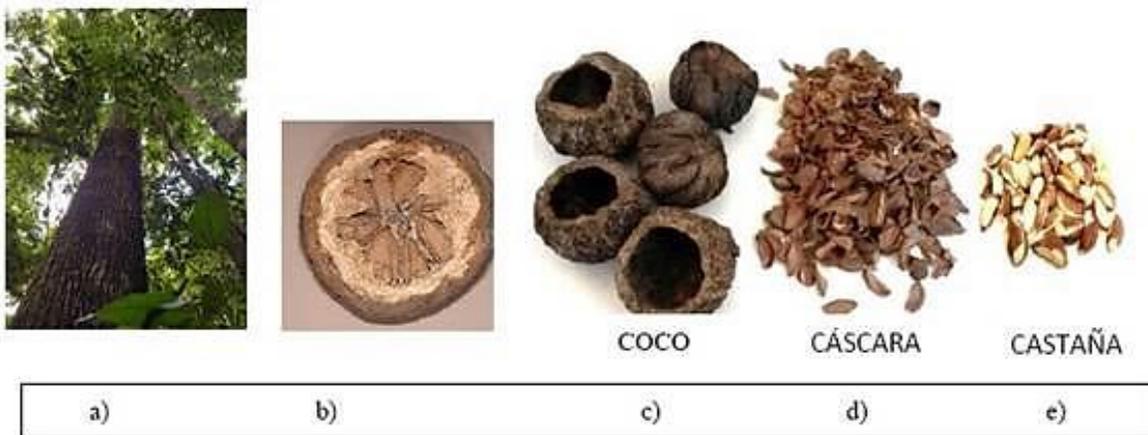
pasivos aplicados, solo puede alcanzar hasta un pH de 7,5 a 8, por lo que la eliminación de algunos metales pesados tóxicos disueltos, no es posible. (Ing. Zamorra, 2022)

2.9. CASCARA DE CASTAÑA COMO SOPORTE DE LAS NANOPARTÍCULAS

La cascara de castaña en Bolivia es un Subproducto del procesamiento de castaña, un fruto común en la región amazónica del país. La cascara, aunque generalmente considerada un desecho, tiene varios usos potenciales. Por ejemplo, puede utilizarse como combustible para la generación de energía o como material para la fabricación de abono orgánico, puede ser utilizada como material adsorbente debido a su composición porosa y capacidad para retener contaminantes y compuestos no deseados. Este uso es especialmente relevante en aplicaciones de purificación de agua y tratamiento de efluentes industriales, donde la cascara de castaña puede eliminar metales pesados, colorantes y otros contaminantes orgánicos e inorgánicos. Además, este material puede ser una alternativa sostenible y de bajo costo en comparación con otros adsorbentes comerciales.

Sin embargo, su eficacia y aplicabilidad dependen de varios factores, como el tipo de contaminante, la preparación del material, y las condiciones de operación.

Figura17. Castaña en todas sus presentaciones



Fuente: (Marin & Rodrigo, 2023)

Dónde: a) árbol de castaña b) fruto de castaña c) coco d) cascara de castaña e) castaña.

2.9.1. Propiedades de la cascara de castaña

Tabla7. Propiedades de la cascara de castaña

Estructura	Estructura amorfa, con apariencia fibrosa y porosa	(Georgin, Marques, Peres, Allasia, & Dotto, 2018), (Casarin, 2014)
Composición	Lignina 51.3 %, Holocelulosa 44.3 % Cenizas 1.6 %	(Cabezas, 2018), (Basso & Cukierman, 2003)
Presencia de grupos funcionales	Presencia de aminas, grupos oxidrilo (carbohidratos, ácidos grasos, proteínas), enlaces C-H (compuestos alifáticos, enlaces C=O (ácidos carboxílicos, cetonas)	(Georgin, Marques, Peres, Allasia, & Dotto, 2018), (Casarin, 2014), (Lineres, 2018)
Capacidad de adsorción en soluciones sintéticas	T=25 °C: Cd ⁺² = 4 (mg/g) Pb ⁺² =4.12 (mg/g) Cr ⁺³ =3.52 (mg/g) Zn ⁺² = 4.86 (mg/g)	(Casarin, 2014)
	T=28 °C: Cd ⁺² = 19 (mg/g) Ni ⁺² = 7.63 (mg/g)	(Basso & Cukierman, 2003)

Fuente: (Sanchez C. E., 2021)

2.10. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS PARA EL PRESENTE PROYECTO

El presente proyecto amplía los estudios previos realizados por la Ing. Sánchez Estefany, cuyo Proyecto de Grado titulado: "**Obtención de Nanopartículas de Fe/Cu Soportadas en Cáscara de Castaña para la Remoción de Metales del DAM provenientes de Milluni, La Paz**", abordó inicialmente la caracterización del Drenaje Ácido de Mina (DAM) y de la cáscara de castaña como material de soporte. Posteriormente, sintetizó nanopartículas de Cobre (Cu) y Hierro (Fe), que fueron depositadas en la cáscara de castaña para formar el nanocomposito. Mediante estudios a escala de laboratorio y procesos en Batch, demostró que este composito es eficaz para la remoción del metal Zinc (Zn), obteniendo los siguientes datos y resultados en su investigación:

Tabla8. Características del DAM- Milluni

Parámetro	Unidad	Límite de detección	Muestra Julio 2017 (Portillo)	Muestra junio 2019	Muestra octubre 2019	Promedio muestra 2019	Valor máximo RMCH Clase C	Valor máximo RMCH Clase D

			P. , 2017)					
pH	-	-	2.37	2.67	2.54	2.6	6 - 9	6 - 9
Temperatura	°C	-	-	8	7	7.5	+/-3°C	+/-3°C
Hierro	mg/L	0.050	485.0	297	319	308	1	1
Zinc	mg/L	0.038	105.0	129	125	127	5	5
Manganeso	mg/L	0.020	-	22	28	25	0.1	0.1
Cobre	mg/L	0.084	2	2	-	-	1	1
Cadmio	mg/L	0.020	-	0.47	-	-	0.005	0.005
Arsénico	mg/L	0.0010	-	-	0.14	-	0.05	0.01
Plomo	mg/L	0.050	<0.050	<0.050	-	-	0.05	0.1

Fuente: (Sanchez C. E., 2021)

En la tabla 9 muestra la capacidad de adsorción y la cinética que presenta el compuesto sintetizado.

Tabla9. Características de nanocomposito

Nano partículas	Isoterma de Langmuir	Cinética de adsorción
Tamaño de nanopartículas = 15nm Densidad aparente = 552 kg/m ³ Tamaño de cascara de castaña=(1.18 a 1.71 mm)	b = 0.04L/mg q = 9.2mg/g	n = 1 K = 0.59468 /h

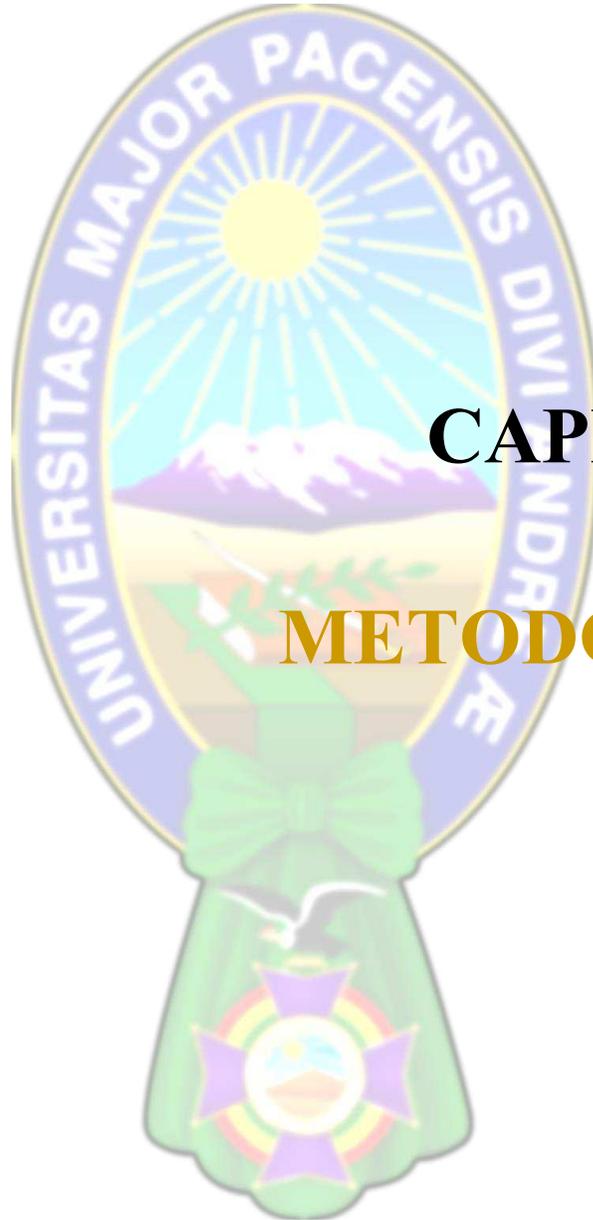
Fuente: (Sanchez C. E., 2021)

A través de pruebas en laboratorio a escala Batch, realizadas a una temperatura que osciló entre 17 y 20 °C, se logró remover un 30% del zinc (Zn) presente en el drenaje ácido de mina. Dado este resultado, se considera necesaria la ampliación del estudio para incluir el tratamiento en una columna de adsorción de lecho fijo. Este enfoque permitirá evaluar no solo el volumen de drenaje ácido que se puede tratar eficientemente, sino también optimizar y aumentar el porcentaje de remoción del metal zinc a niveles superiores.

En la siguiente fase del proyecto, se llevará a cabo el diseño y la simulación de una columna de adsorción de lecho fijo. Este sistema permitirá un tratamiento continuo y podría ofrecer una

remoción más eficiente del zinc en comparación con el proceso Batch. Además, se analizarán variables clave como el caudal de entrada, la altura del lecho y el tiempo de residencia para maximizar la capacidad de adsorción del nanocomposito. El estudio comparará los resultados obtenidos con los obtenidos en tratamientos con zeolita y sistemas Batch previamente documentados en la literatura científica





CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES DE DISEÑO DE COLUMNA

Con base a la evaluación del material adsorbente y los estudios previos realizados en el laboratorio del Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) y los resultados obtenidos Tabla 8 y Tabla 9, estos parámetros se hicieron uso de las mismas en cuanto al empaque de la columna de adsorción. En cuanto a las variables del proceso de adsorción de la columna se tomaron los siguientes criterios:

Considerando los criterios de diseño, se seleccionó una porosidad de 0.4 y un diámetro de columna de 16 cm para mejorar la distribución del flujo y asegurar un contacto uniforme entre el adsorbente y el adsorbato. Estos valores se seleccionó con base a la revisión bibliográfica mencionada en la Tabla 3. La altura del lecho se determinó resolviendo la ecuación diferencial parcial (Ec. 28).

3.1.1. Variables de Operación de la columna de adsorción de lecho fijo

3.1.1.1.Caudal de alimentación (Q)

Una variable muy importante es la elección del caudal con el cual se trabajará, siendo que al utilizar un caudal elevado puede afectar en la capacidad del material adsorbente. Por ello considerando la revisión bibliográfica mencionada en la Tabla 3, en el presente proyecto se optó por trabajar inicialmente con un caudal volumétrico de alimentación de 10mL/s, posterior a ello en la etapa de simulación se varia con 18, 25 y 50 mL/s. A través de simulaciones, se pudo analizar la adsorción más favorable en términos de tiempo de ruptura y tiempo de saturación.

3.1.1.2.Concentración final del efluente

De acuerdo con lo establecido en la Ley 1333 de Medio Ambiente y Aguas, el límite máximo permitido de zinc (Zn) en cuerpos de agua es de 5 ppm, como se indica en la Tabla 8. Por lo tanto, en nuestro estudio, este valor se considerará como el límite permisible para el diseño y funcionamiento de la columna de adsorción.

3.1.1.3.Temperatura de Operación (T)

De acuerdo con el estudio previo realizado en laboratorio, donde las pruebas se llevaron a cabo en un rango de 17 a 20 °C, en el presente proyecto se llevó a cabo el diseño y simulación del proceso de adsorción a una temperatura constante de 18 °C. Esta temperatura fue seleccionada para garantizar que la capacidad de adsorción no se vea afectada.

3.2. EVALUACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

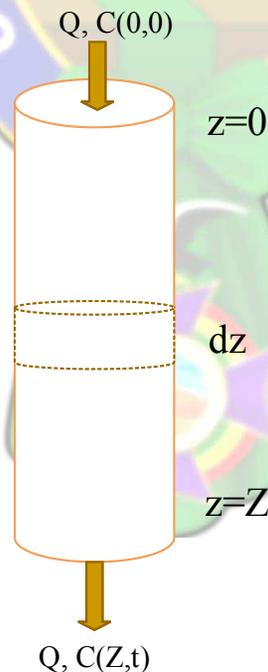
El comportamiento de adsorción en la columna se modela mediante un enfoque matemático basado en balances de masa. Este modelo considera la acumulación de adsorbato, el flujo convectivo, la dispersión axial y la acumulación en la fase sólida. Para desarrollar este modelo, se realizó un balance de materia considerando un volumen de control dentro de la columna de adsorción.

3.2.1. Balance de materia

El modelo matemático generalizado y propuesto mediante un balance de materia por (Cardenas & Ortega, 2015). Para el presente proyecto se realizaron las siguientes suposiciones, esto con base a los datos con las que se cuenta.

- El sistema opera bajo condiciones isotérmicas y un comportamiento de flujo pistón ideal a lo largo de la columna.
- El equilibrio de adsorción esta descrito por la isoterma de Langmuir.
- El transporte de masa será solo convectivo.
- Los mesoporos de las partículas adsorbentes son esféricos y homogéneos en tamaño y densidad.

Figura18. Volumen de control para una columna de lecho fijo



Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta las suposiciones anteriores y realizando un balance en el volumen de control, el balance de masa que se obtiene es el siguiente:

Acumulacion = Entrada – Salida + Generacion



$$\epsilon \cdot A \cdot dz \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = -Q \cdot dz \cdot \frac{\partial c}{\partial z} + D \cdot \epsilon \cdot A \cdot dz \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - dW \cdot \frac{\partial q}{\partial z} + \epsilon \cdot A \cdot dz \cdot r_n \dots \dots \dots \mathbf{Ec.. (21)}$$

Donde;

- C = C(Z, t) concentración del adsorbato en el equilibrio
- t = tiempo
- ε = porosidad del lecho
- v₀ = velocidad inicial superficial
- z = longitud de la columna
- q_m = capacidad maxima de adsorcion
- ρ * (1 – ε_b) = densidad del lecho de adsorcion
- $\frac{q_m \cdot b}{(1 + b \cdot c)^2}$ = isoterma de adsorcion
- b = constante de isoterma de Langmuir

Dividiendo la ec (21) por ε·A·dz considerando la división de Q/A como velocidad de flujo (U₀)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\left(\frac{U_0}{\epsilon}\right) \frac{\partial c}{\partial z} + D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} dz - \frac{dW}{\epsilon \cdot A \cdot dz} \cdot \frac{\partial q}{\partial z} + r_n \dots \dots \dots \mathbf{Ec.. (22)}$$

La densidad de empaque (ρ_{em}) se define como la relación entre la masa del adsorbente y el volumen en la sección de control. Por lo tanto, $\frac{dW}{A \cdot dz} = \rho_{em}$, reemplazando esto en la ecuación 22:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\left(\frac{U_o}{\varepsilon}\right) \frac{\partial c}{\partial z} + D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} dz - \frac{\rho_{em} * \partial q}{\varepsilon \partial t} + r_n \dots \dots \dots \text{Ec.. (23)}$$

La densidad de empaque se relaciona con la densidad de las partículas adsorbentes (ρ_{ads}) mediante: $\rho_{em} = \rho_{ads}(1 - \varepsilon)$.

Consideraciones

- Se asume que el ion Zn en el agua acida no reaccionará con el material adsorbente por lo que la velocidad de reacción es nula ($r_n=0$).
- En el modelo de Plug Flow Ideal (Flujo Pistón), se asume que no hay dispersión longitudinal y que el fluido se mueve a través de la columna sin mezclarse axialmente. Esto simplifica el análisis y diseño del proceso.

Con estas consideraciones, la Ec.(23) se simplifica a:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\left(\frac{U_o}{\varepsilon}\right) \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\rho_{ads}(1-\varepsilon) * \partial q}{\varepsilon \partial t} \dots \dots \dots \text{Ec.. (24)}$$

El equilibrio en la fase sólida y la fase líquida se describe mediante la isoterma no lineal de Langmuir:

$$q = \frac{q_m * b * c}{1 + b * c} \dots \dots \dots \text{Ec.. (25)}$$

Aplicando derivadas parciales respecto al tiempo en la Ec. (25) se obtiene:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{q_m * b}{(1 + b * c)^2} \frac{\partial c}{\partial t} \dots \dots \dots \text{Ec.. (26)}$$

Reemplazando la Ec.(26) en la Ec(24):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\left(\frac{U_o}{\varepsilon}\right) \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\rho_{ads}(1-\varepsilon) * q_m * b}{\varepsilon * (1+b*c)^2} \frac{\partial c}{\partial t} \dots \dots \dots \text{Ec.. (27)}$$

Agrupando términos semejantes y factorizando, la expresión matemática resulta en:

$$\left[1 + \frac{\rho_{ads}(1-\varepsilon) * q_m * b}{\varepsilon * (1+b*c)^2} \right] \frac{\partial c}{\partial t} = -\left(\frac{U_o}{\varepsilon}\right) \frac{\partial c}{\partial z} \dots \dots \dots \text{Ec.. (28)}$$

En la Ec. (28) se muestra la adsorción física de zinc (Zn), en la que se podrá analizar el perfil de concentraciones en función al tiempo y altura de lecho recorrido, tomando en cuenta la capacidad de adsorción de los nanocompositos así mismo la velocidad de adsorción.

Definiendo:

$$R = \left[1 + \frac{\rho_{ads}(1 - \epsilon)}{\epsilon} * \frac{q_m * b}{(1 + b * c)^2} \right] = \text{factor de retraso}$$

$$v = \left(\frac{U_o}{\epsilon} \right) = \text{velocidad de flujo}$$

Con la solución del modelo matemático haciendo uso del método numérico ‘diferencias finitas’, a través del software Matlab, se obtuvieron las variables respuesta, tales como el tiempo a la cual la concentración es 5ppm limite permisible para cuerpos de agua clase C, la longitud del lecho de adsorción, así mismo el perfil de concentraciones a lo largo de la columna y el tiempo.

Para la solución de la ecuación matemática se utilizaron los siguientes parámetros y condiciones:

Tabla10. Parámetros y Condiciones

Condiciones de operación	Características del adsorbente	Características de la columna	Isoterma de adsorción De Langmuir
Ci= 127 mg de Zn/ L Q= 10mL/s Cf=5 ppm	ρ_{ads} = 552 kg/m ³ ϵ = 0.4	Di= 0.16 m A= 0.02 m ² Uo= (Q/A) = 0.0005 m/s	q_m = 9,2 mgZn/g adsorbente b=0.04 L/mg Zn

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Dimensionamiento de la columna de adsorción

Con base a revisión bibliográfica se procedió a trabajar con un valor de diámetro interno de promedio de 16 cm (Tabla 3), con lo que se resolvió la ecuación diferencial parcial Ec. (27). La solución de esta ecuación permitió determinar un perfil de concentraciones a diferentes alturas de lecho y tiempo de ruptura. Además, si la longitud del lecho resultante es excesivamente grande o

pequeña, se ajusta según criterios de diseño o referencias bibliográficas (Avila, Puello, & Castilla, 2019), dado que la altura del lecho varía proporcionalmente con el tiempo de saturación.

Asimismo, se consideró la relación $L/D = 3$ (Robert H. Perry, 2000), para evaluar el comportamiento de adsorción a diferentes alturas de lecho posteriormente en la simulación.

3.3. SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE ADSORCIÓN

La simulación del proceso de adsorción se llevó a cabo para estudiar el comportamiento dinámico del sistema determinando el tiempo de saturación como el tiempo de ruptura del lecho fijo.

3.3.1. Herramientas y Software utilizados

- **Software de simulación**

Se utilizó el software Aspen adsorption V14, que es un software ampliamente utilizado en la industria para simular y optimizar procesos químicos y de separación además de operaciones de adsorción.

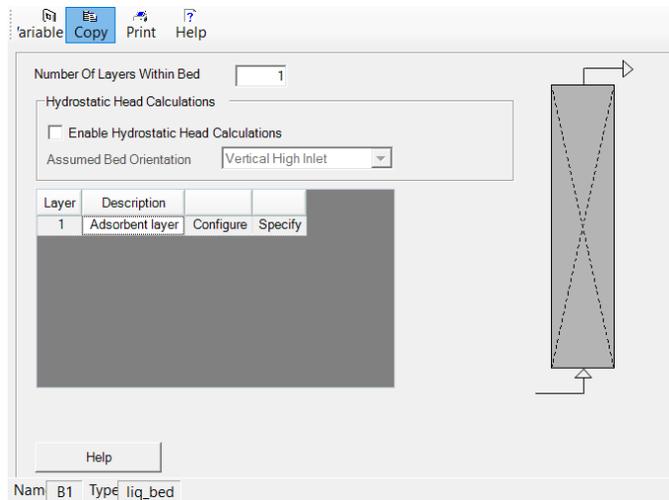
- **Modelos Matemático**

Se utilizó el modelo de isoterma de adsorción de Langmuir, para describir la relación entre la concentración del adsorbato en la fase líquida y en el adsorbente y modelos cinéticos de pseudo-primer orden que describe la velocidad de adsorción.

3.3.2. Definición del Sistema

- **Geometría de la columna:** Se especificaron las dimensiones de la columna de adsorción, altura de lecho y diámetro de la columna.
- **Propiedades del Adsorbente:** Se ingresaron las propiedades del adsorbente tales como la capacidad de adsorción, la densidad aparente, porosidad, tamaño de partícula.

Figura19. Definición del sistema de adsorción

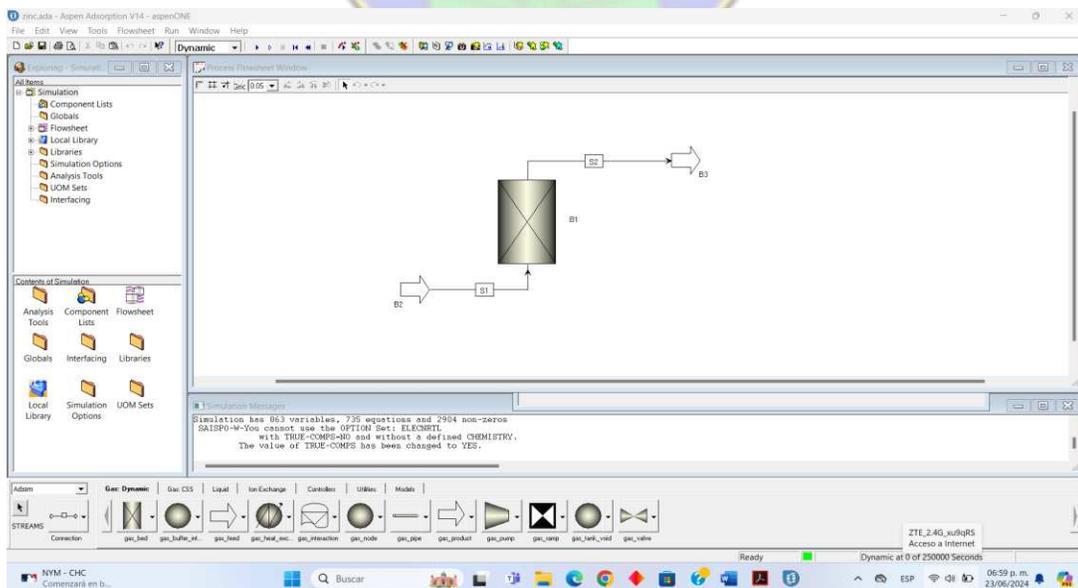


Fuente: Aspen Adsorption V14

3.3.3. Condiciones de Operación

- **Caudal de Alimentación:** Se establecieron diferentes caudales de alimentación para evaluar su efecto en el proceso de adsorción.
- **Concentración inicial del Adsorbato:** se trabajará con concentración de 127 ppm que serán constantes a la entrada del adsorbedor.
- **Temperatura y Presión:** Se fijaron las condiciones de temperatura y presión que se mantendrán constantes.

Figura20. Esquema de simulación



Fuente: Aspen Adsorption V14

En la siguiente tabla 8 se presentan los valores introducidos al software de simulación.

Tabla11. Parámetros de Simulación

Parámetros	valor	variaciones
Caudal	(10-50) mL/s	10, 18, 25 y 50
Altura de lecho	(0.5-1.2) m	0.5, 0.8, 1, 1.2
Diámetro interno de la columna	0.16 m	
Tamaño de nanopartículas	15 nm	
Porosidad (e)	0,4	
Capacidad de adsorción (qm)	9,2 mg/g	
Constante de Langmuir (b)	0,04 L/mg	
Concentración de alimentación (Ci)	127 ppm de Zn	
Temperatura (T)	18 °C	
Presión atmosférica	495 mmHg	
Densidad adsorbente	552 kg/m ³	
Diámetro partícula de castaña	1,71 mm	

Fuente: Elaboración Propia



CAPÍTULO 4

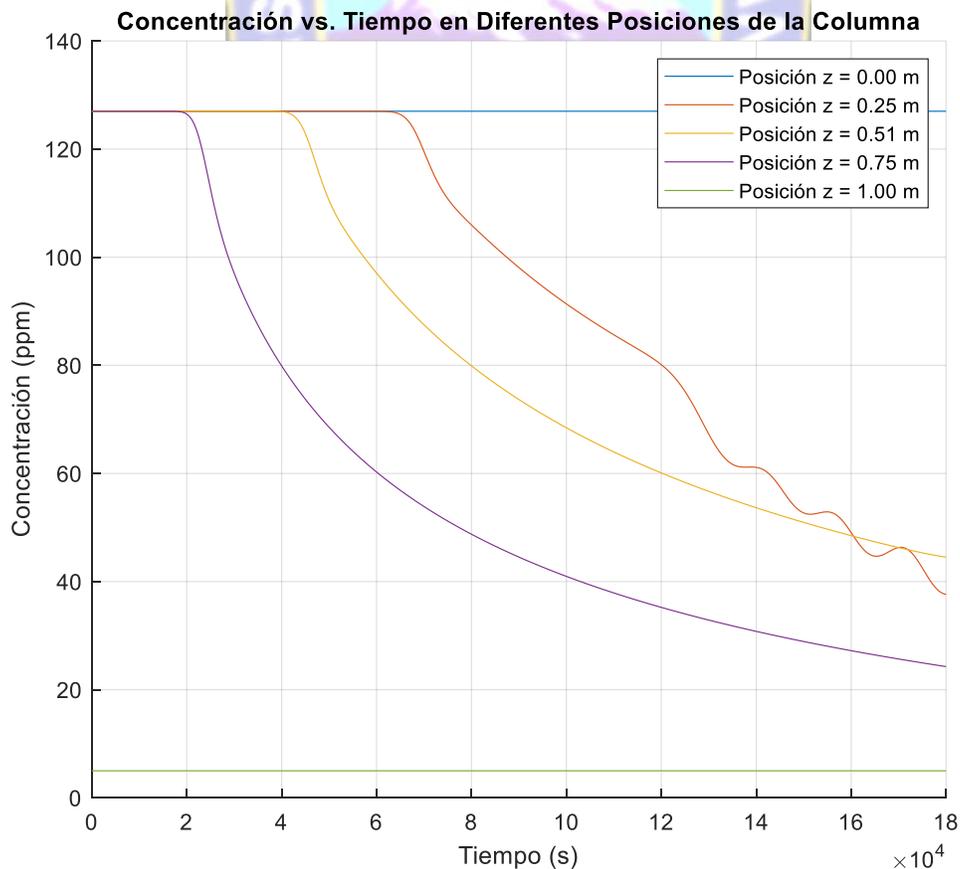
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se presentan y analizan en detalle los resultados obtenidos al resolver el modelo matemático que describe el comportamiento de una columna de adsorción de lecho fijo utilizando el software Matlab. Además, se exponen los resultados de las simulaciones realizadas con el software Aspen Adsorption, proporcionando una visión integral del proceso de adsorción.

4.1. RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

La ecuación diferencial parcial previamente mencionada se resolvió empleando el método numérico de diferencias finitas. Los resultados obtenidos se presentan en el Grafico 1, que ilustra los perfiles de concentración de zinc (Zn) a lo largo de la altura del lecho de adsorción. Se observó que el tiempo requerido para alcanzar una concentración mínima de 5 ppm fue de aproximadamente de 49 horas, a una altura de lecho de 1 m.

Grafico1. Perfil de concentración en función del tiempo y altura de Lecho



Fuente: Matlab 2023b

El cambio de la concentración a lo largo del lecho también permite identificar las zonas de saturación a lo largo de la altura de lecho, como observa cuando entra en contacto el material adsorbente y el soluto la concentración es 127 ppm, conforme avanza el soluto por el lecho va cambiando la concentración tal es el caso de cuando $z= 0.25$ m, 0.51 m, 0.75 m, lo cual nos indica que el soluto cuando avanza por la columna se va depositando en poca cantidad en cierta altura de lecho.

Para validar y optimizar los resultados del modelo se procedió a simular con las que permitieron analizar la variación de la concentración de zinc (Zn) en el efluente a lo largo del tiempo. Con el objetivo de optimizar el proceso, se llevaron a cabo ajustes en la altura del lecho y caudal suministrado a la columna de adsorción, evaluando su impacto en la eficiencia de remoción del metal.

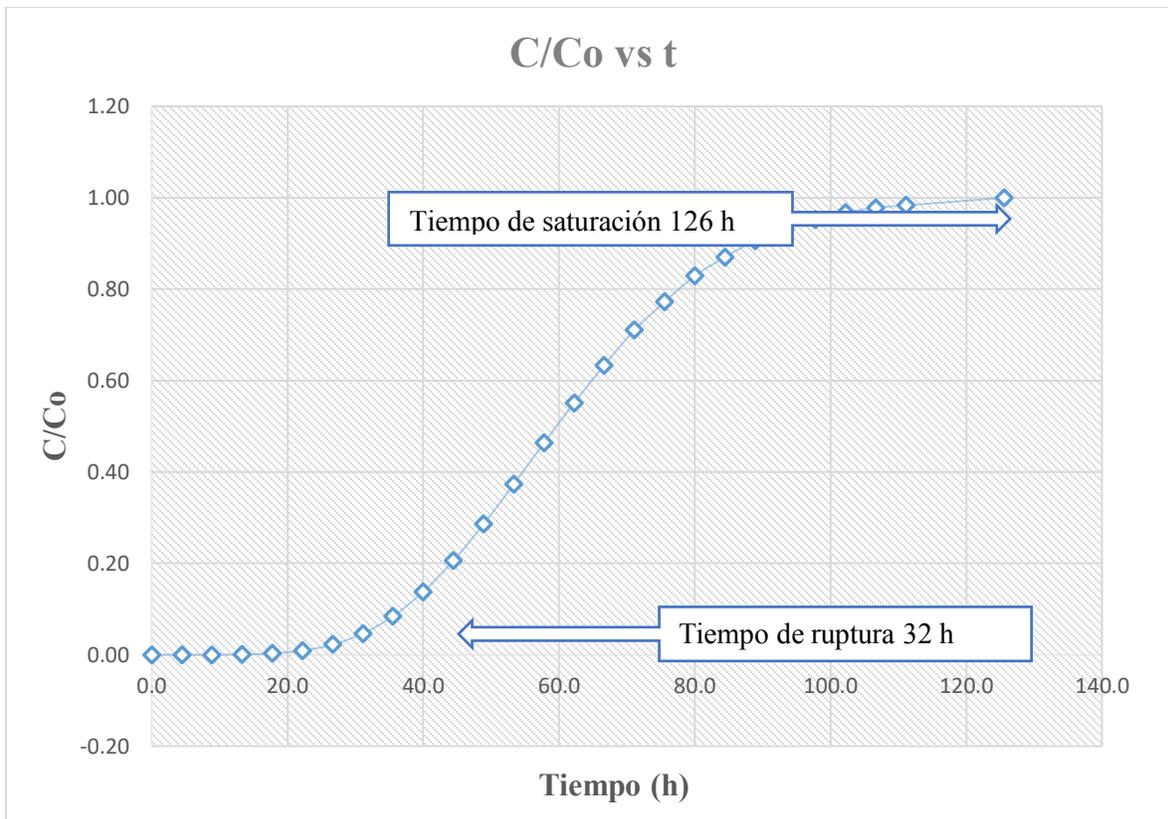
4.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN LA ADSORCIÓN DE Zn

Se llevaron a cabo las simulaciones, aplicando constantes de Langmuir y propiedades del material adsorbente que se mantuvieron constantes en relación con el caudal y altura del lecho. Inicialmente, se configuro el sistema con una altura de lecho de 1 m y un caudal de 10ml/s. posterior a ello se realiza la variación de caudal y altura de lecho.

A continuación, se presentan los resultados detallados de las pruebas realizadas, que incluyeron la variación de la concentración de zinc a lo largo del lecho y el impacto de los diferentes caudales en el tiempo de saturación. Estos resultados proporcionan información clave para la optimización del proceso de adsorción y el diseño del sistema de tratamiento.

4.2.1. Simulación de la adsorción de zinc con caudal 10 mL/s

Grafico2. Curva de ruptura caudal 10 mL/s



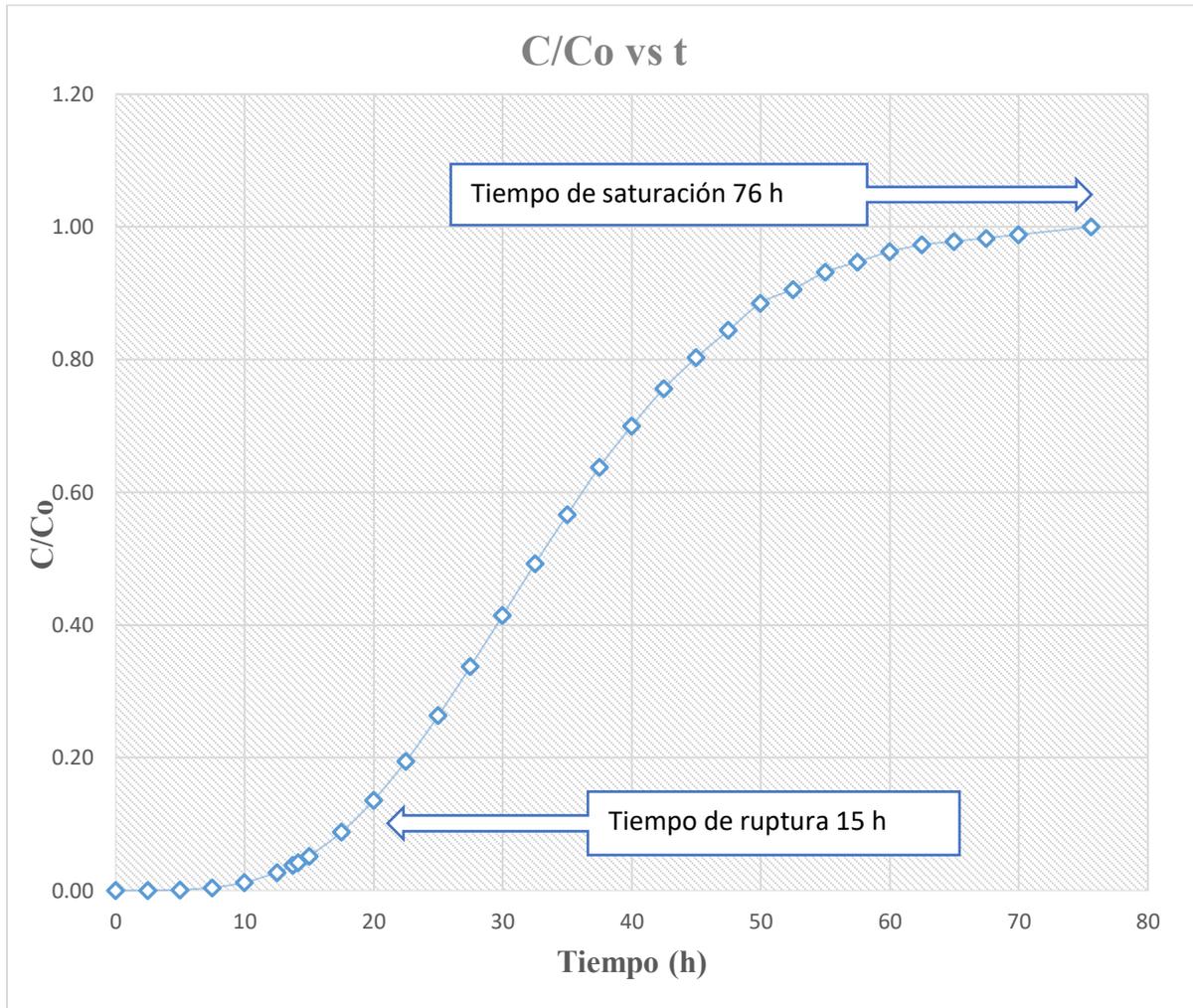
Fuente: elaboración propia

Como se ilustra en el Gráfico 2, el análisis de la concentración de zinc (Zn) en el efluente revela que el tiempo de ruptura se alcanza a las 32 horas. Este punto marca el momento en el que el lecho adsorbente comienza a saturarse, lo que resulta en un aumento significativo de la concentración de Zn en el efluente. La saturación completa de la columna se observa a las 126 horas, equivalente a aproximadamente 5.25 días. Este hallazgo sugiere que la columna puede funcionar de manera efectiva durante un período cercano a 6 días antes de que el adsorbente requiera reemplazo.

El tiempo de saturación en este estudio es consistente con las observaciones de Castello (2017), quien, trabajando con un caudal de 70 mL/s, un diámetro de columna de 24 cm y una altura de lecho de 1 m, reportó un tiempo de saturación cercano a 5 días. Estos resultados son fundamentales para la planificación operativa y el mantenimiento de la columna de adsorción, ya que proporcionan una base para optimizar la gestión del proceso de adsorción y prevenir interrupciones en el tratamiento, asegurando así una operación continua y eficiente.

4.2.2. Simulación de la adsorción de zinc con caudal 18 mL/s

Grafico3. Curva de ruptura caudal 18 mL/s

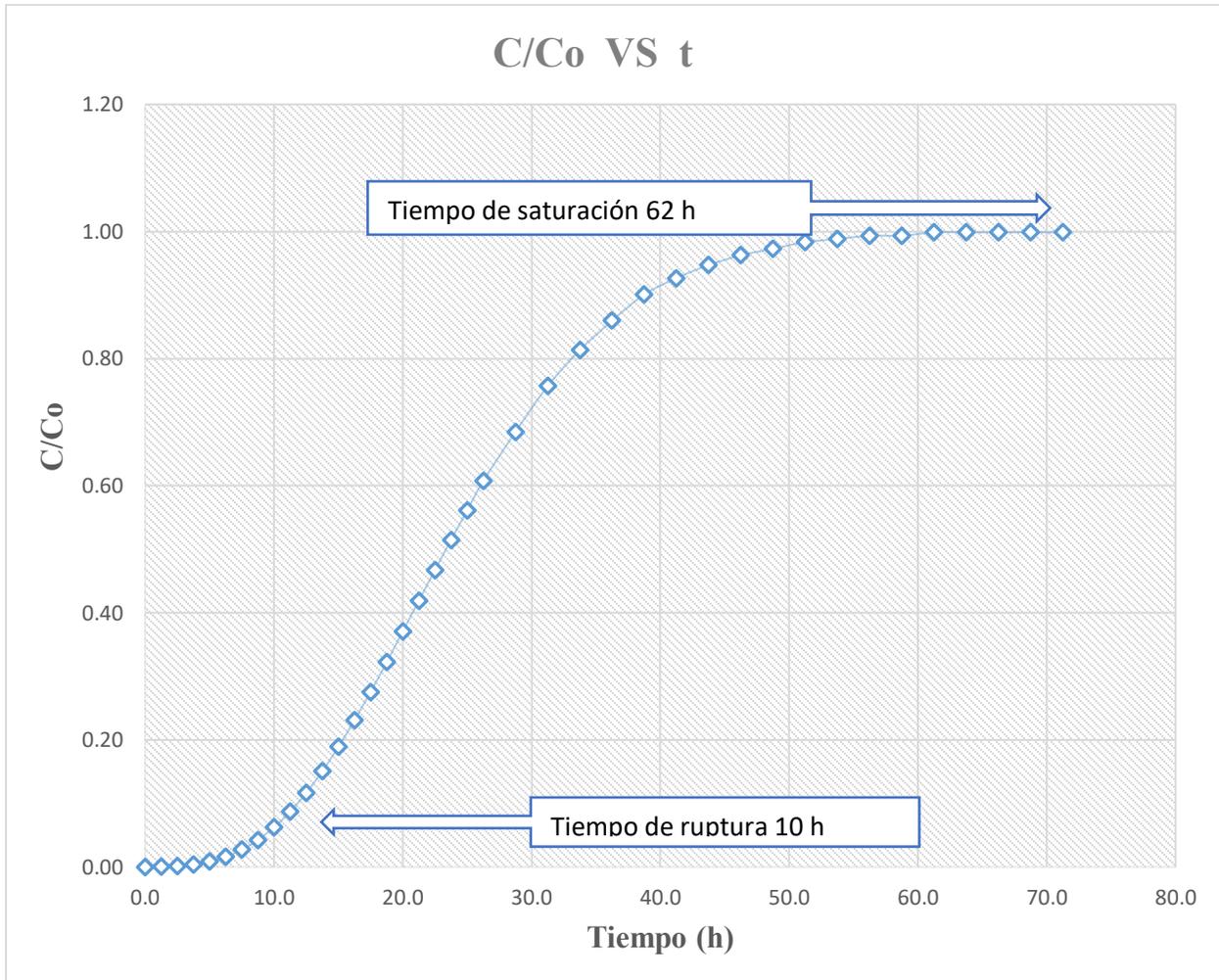


Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en el Gráfico 3, el tiempo de ruptura se alcanza a las 15 horas, mientras que la saturación completa de la columna ocurre a las 76 horas, lo que indica que la columna opera de manera efectiva durante 3.2 días. Comparado con los resultados obtenidos a un caudal de 10 mL/s, donde se observan tiempos de ruptura y saturación más prolongados, los tiempos registrados a un caudal de 18 mL/s son significativamente menores. Estos resultados confirman que un mayor caudal disminuye tanto el tiempo de ruptura como el tiempo de saturación, lo que se alinea con las observaciones de Patel (2021), quien describe cómo un incremento en el caudal de flujo afecta la eficiencia de la adsorción.

4.2.3. Simulación de la adsorción de zinc con caudal 25 mL/s

Grafico4. Curva de ruptura caudal 25 mL/s

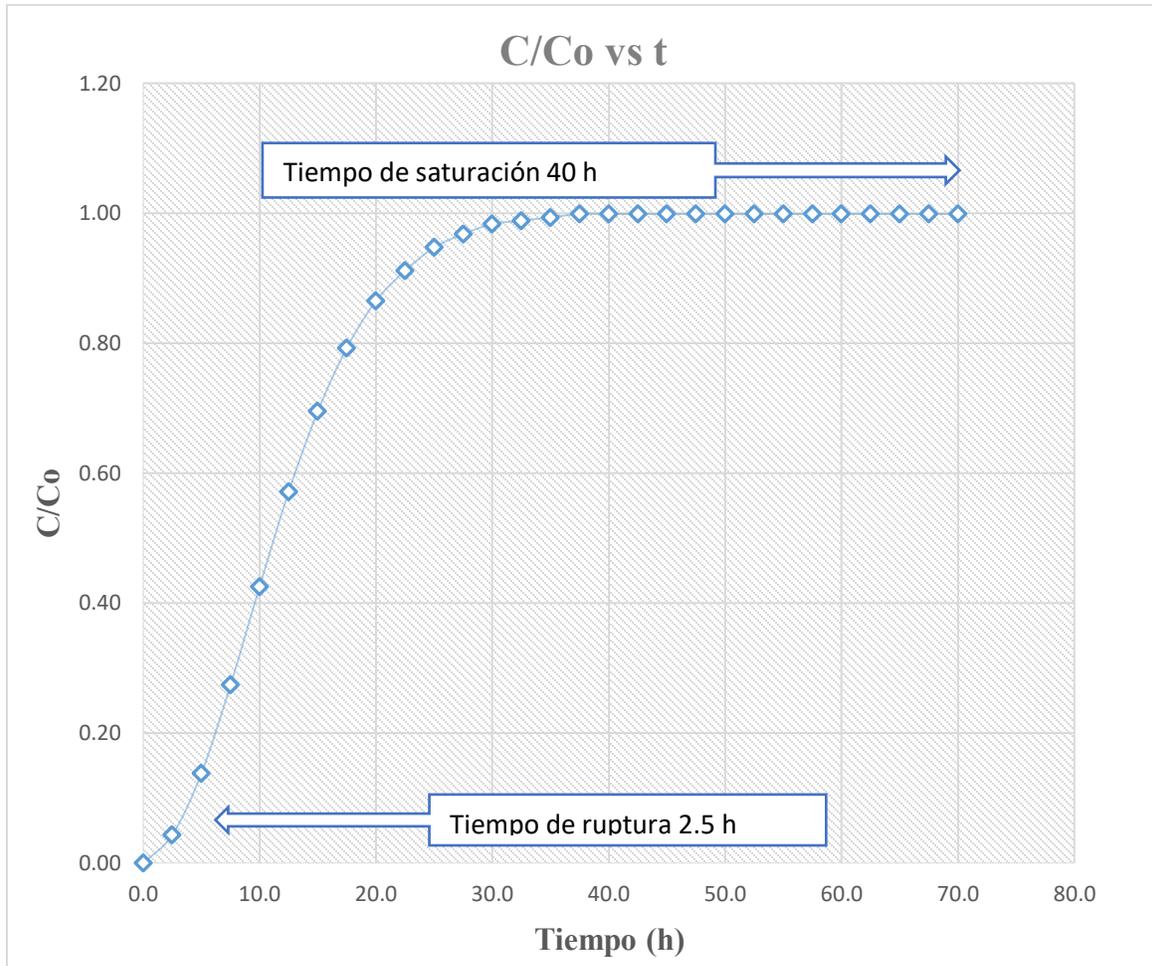


Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en el Gráfico 4, el tiempo de ruptura se alcanza a las 10 horas, mientras que la saturación completa de la columna se observa a las 62 horas, lo que indica que la columna opera de manera efectiva durante aproximadamente 2.6 días. Al comparar estos resultados con los obtenidos a un caudal de 18 mL/s, se observa que los tiempos de ruptura son relativamente similares, con una diferencia de solo 5 horas. Sin embargo, el tiempo de saturación para el caudal de 25 mL/s es significativamente menor en comparación con el caudal de 18 mL/s. Estos hallazgos sugieren que un aumento en el caudal reduce el tiempo de saturación, aunque el impacto sobre el tiempo de ruptura es menos pronunciado.

4.2.4. Simulación de la adsorción de zinc con caudal 50 mL/s

Grafico5. Curva de ruptura caudal 50 mL/s

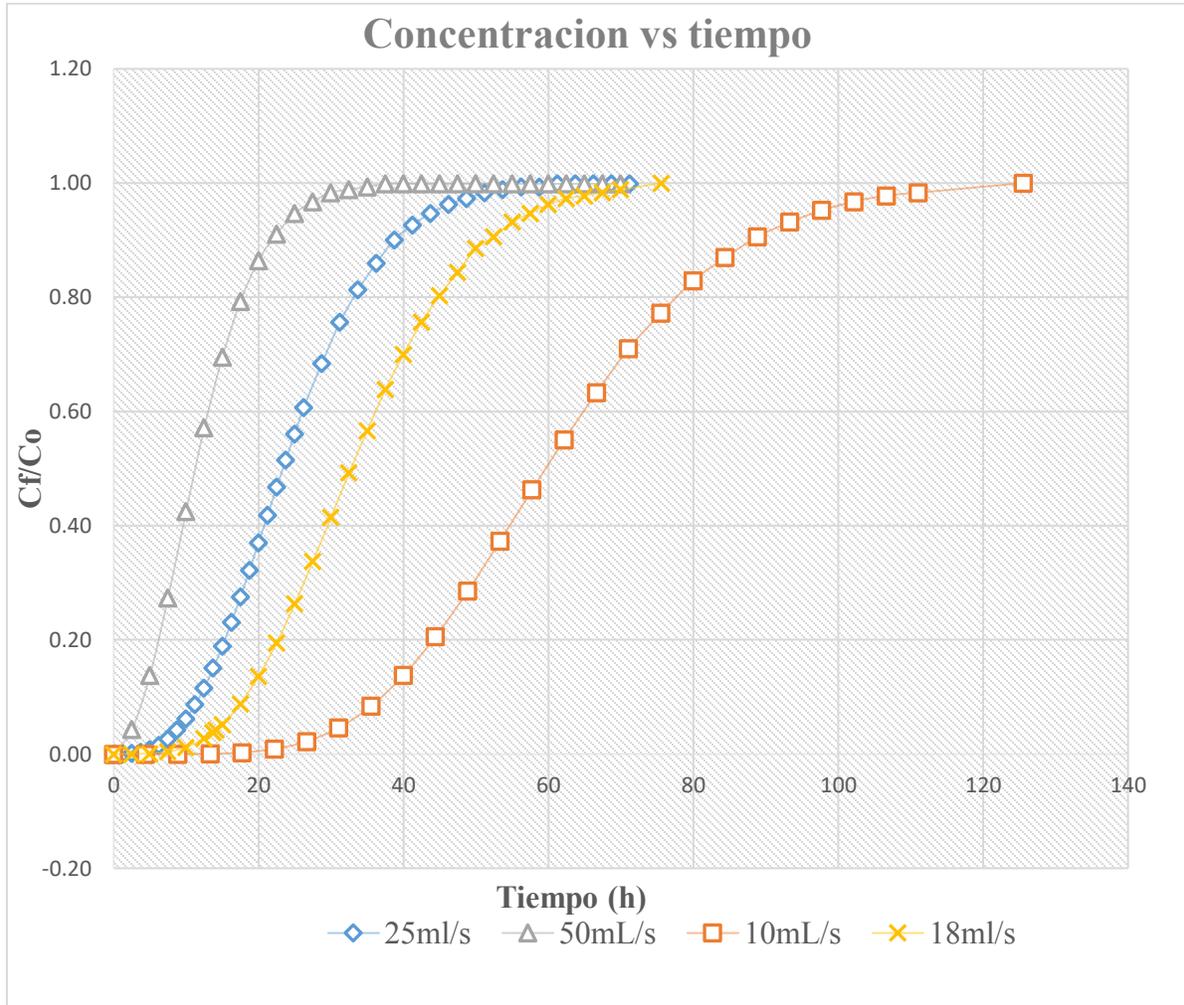


Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en el Gráfico 5, el tiempo de ruptura se alcanza a las 10 horas, y la saturación completa de la columna se observa a las 40 horas, lo que indica que la columna opera de manera efectiva durante aproximadamente 1.7 días. En comparación con los resultados obtenidos a caudales de 10, 18 y 25 mL/s, los tiempos de ruptura y saturación para este caudal específico presentan diferencias relativamente significativas. Estos hallazgos confirman las observaciones de (John.C.Berg, 2010), quien señala que un aumento en el caudal generalmente resulta en una reducción de los tiempos de ruptura y saturación. Sin embargo, también advierte que un caudal excesivamente alto puede llevar a una adsorción demasiado rápida, lo que podría reducir la eficiencia del proceso debido a rendimientos subóptimos.

4.2.5. Comparación de curvas de saturación

Grafico6. Curva de ruptura a diferentes caudales



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 6 se pueden observar los tiempos de ruptura y saturación para distintos valores de caudal. Los resultados obtenidos indican que el caudal varía de manera inversa con el tiempo; es decir, a mayores caudales corresponden menores tiempos de saturación y de ruptura y viceversa. Esto implica que se obtendrán mejores rendimientos de adsorción trabajando con un caudal igual a 10 mL/s, pero se tendrán tiempos muy prolongados.

Tabla12. Resumen: Tiempos de saturación y ruptura para distintos caudales

parámetro	valor	Tiempo de ruptura(horas)	Tiempo de saturación(horas)	Tiempo a la cual cumple con el reglamento(horas)	Volumen tratado(L)
Caudal (mL/s)	10	32	126	32	1152
	18	15	76	15	972
	25	10	62	10	900
	50	2.5	40	2.5	450

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 10 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la simulación variando el caudal de alimentación, se puede observar que hasta el punto de ruptura que es cuando la concentración de Zn comienza a aumentar, se pueden tratar los siguientes volúmenes de drenaje ácido de mina:

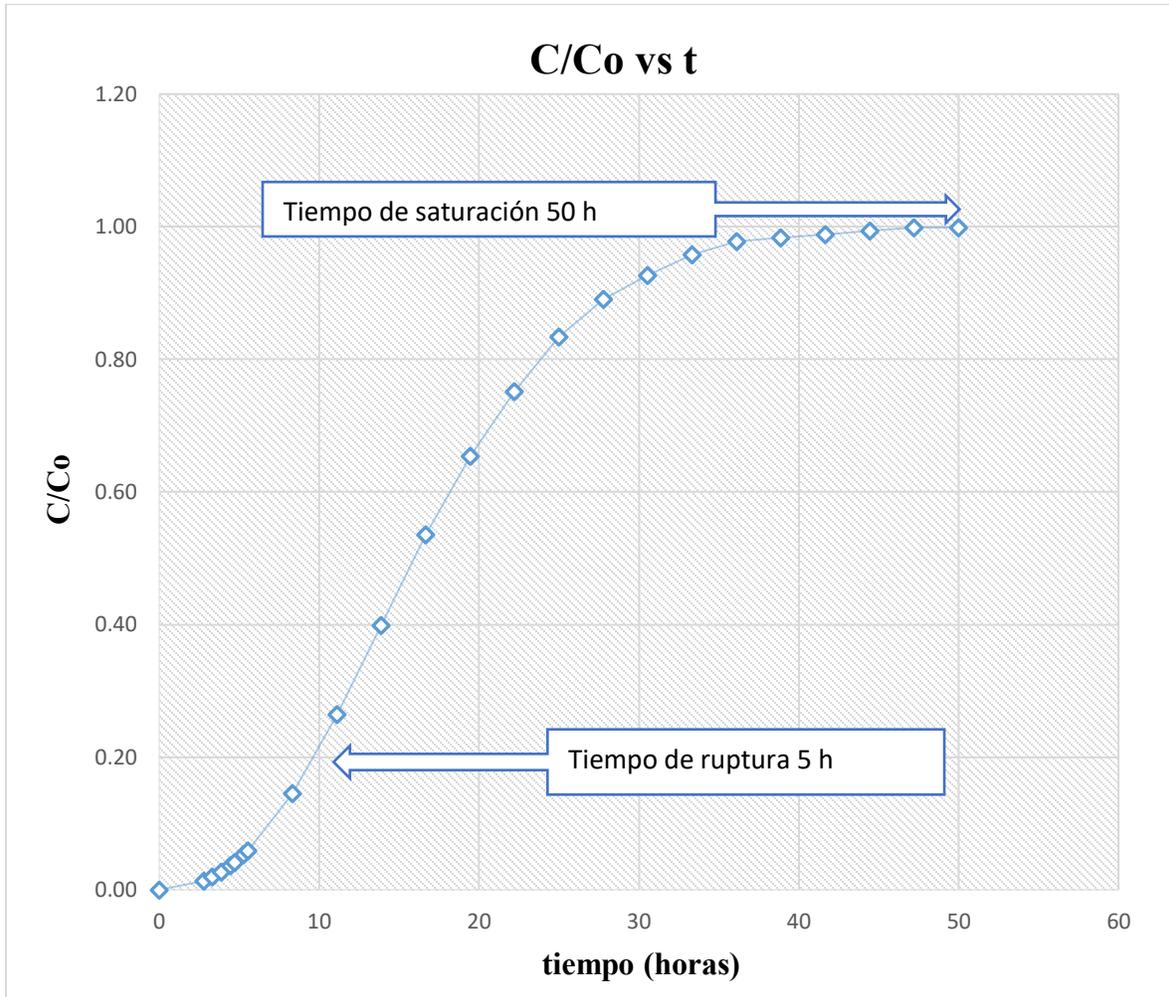
- Con un caudal de 10 mL/s, es posible tratar un volumen de 1152 L en un tiempo de 32 horas. A partir de este tiempo, la eficiencia del adsorbente comienza a disminuir, lo que resulta en un incremento progresivo de la concentración de zinc (Zn) en el efluente. El tiempo estimado para que el adsorbente alcance su punto de saturación a este caudal es de 126 horas.
- Con un caudal de 18 mL/s, se puede tratar un volumen de 972 L en 15 horas, alcanzando una concentración en el efluente de 5ppm, que es el límite permitido según la RMCH. El adsorbente alcanza su saturación en 75,62 horas de operación a este caudal.

Según (Crittenden & Trussell, 2012), es fundamental monitorear el tiempo de ruptura como el punto de saturación en las columnas de adsorción, ya que operar más allá de estos límites puede comprometer la eficiencia del proceso y llevar a fallas en el tratamiento.

Terminando con la simulación variando caudales se procedió el cambio de alturas de lecho partiendo de 50 cm según la relación de $Z/D=3$ (Robert H. Perry, 2000) posterior a ello se va incrementado la altura de lecho, los resultados de dicha variación se muestran a continuación:

4.2.6. Simulación de la adsorción de Zn con altura de lecho 0.50 m

Grafico7. Curva de ruptura con 0.50 m de altura de lecho



Fuente: Elaboración propia

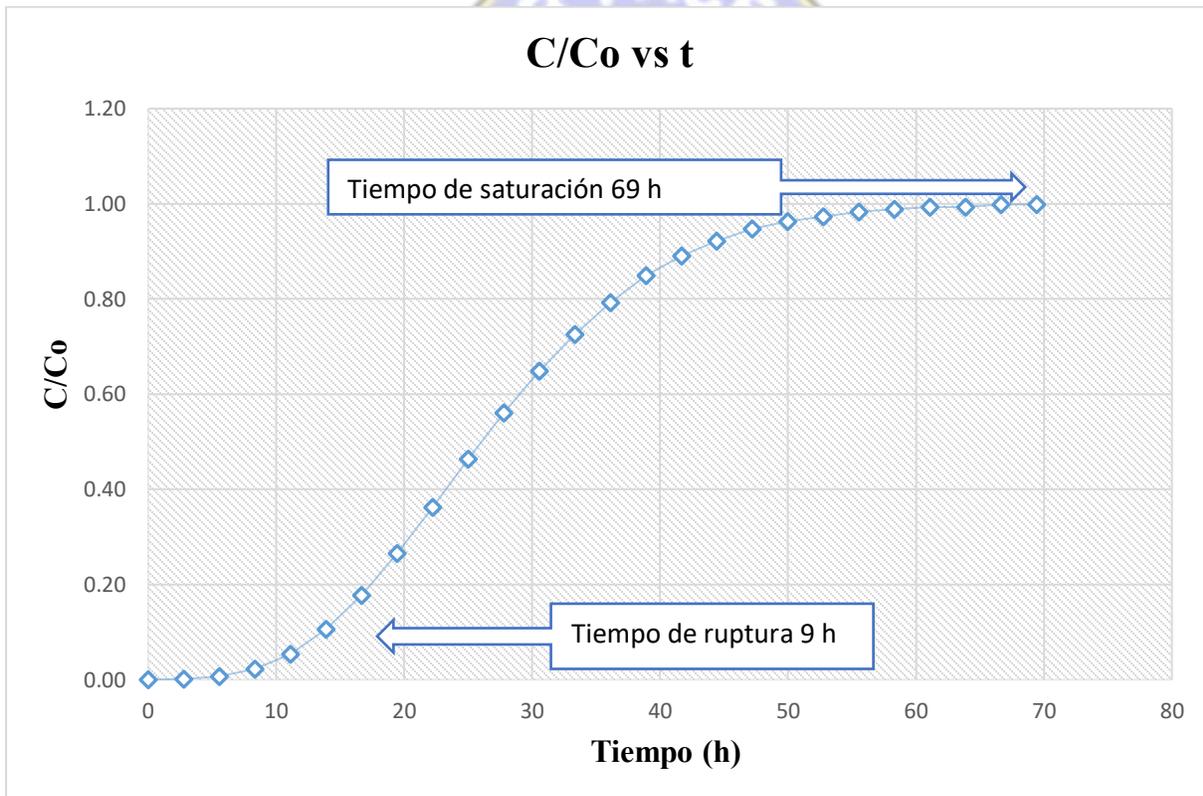
Como se ilustra en el Gráfico 7, el tiempo de ruptura se observa a las 5 horas, en el cual la concentración de zinc (Zn) en el efluente comienza a incrementarse significativamente. Este fenómeno sugiere que la capacidad de adsorción del lecho está comenzando a decaer, una observación consistente con los principios descritos por (Patel, 2021), quien destaca que el tiempo de ruptura marca el inicio de la saturación del material adsorbente.

A medida que el proceso avanza, se alcanza el tiempo de saturación a las 50 horas que equivale 2 días. En este punto, el lecho ha agotado completamente su capacidad de adsorción, y la concentración de zinc en el efluente se estabiliza, indicando que el lecho ha alcanzado su límite de

adsorción efectiva. Este comportamiento es coherente con lo reportado en estudios previos, como el de (John.C.Berg, 2010) que afirma que la saturación del lecho se manifiesta cuando la capacidad de adsorción del material se ha completado y la eficiencia del proceso de remoción se estabiliza.

4.2.7. Simulación de la adsorción de zinc con altura de lecho 0.80 m

Grafico8. Curva de ruptura con 0.80 m de altura de lecho

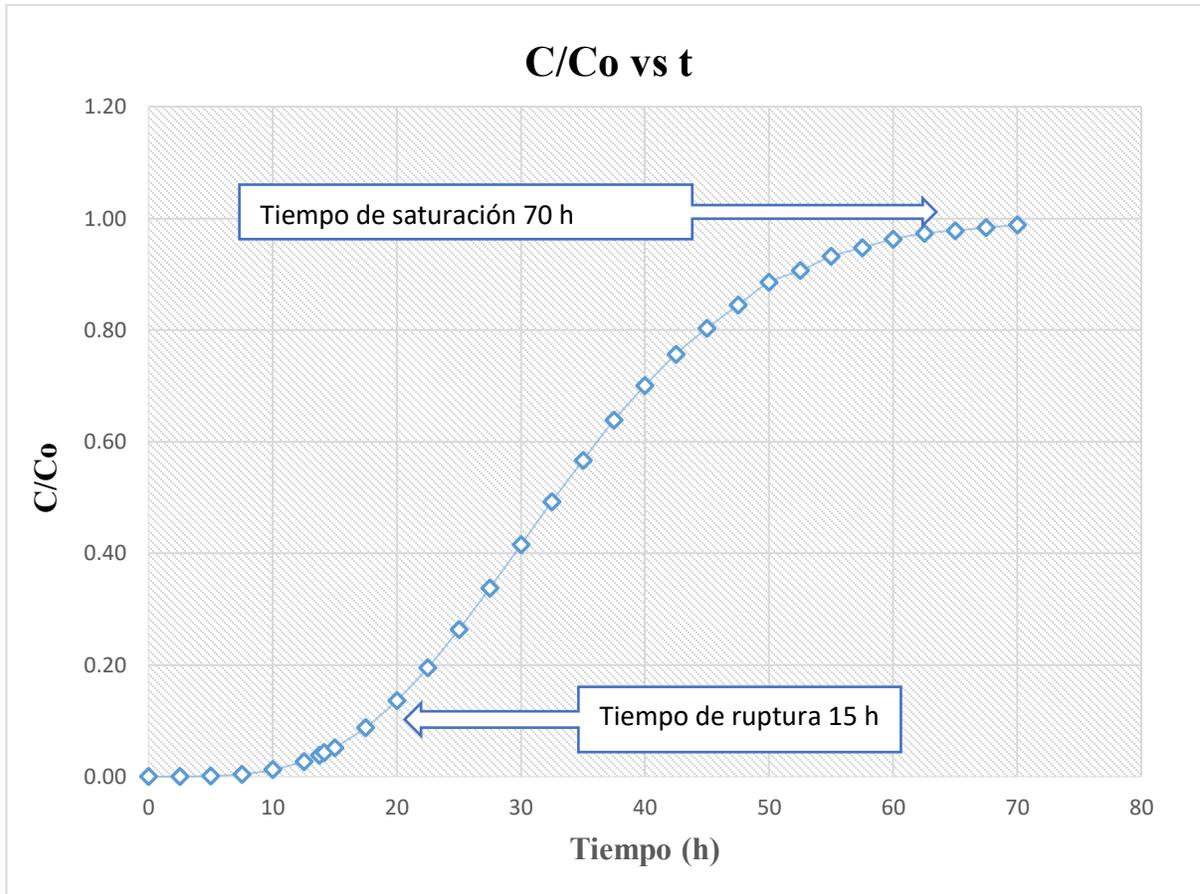


Fuente: Elaboración propia

Como se ilustra en el Gráfico 8, el tiempo de ruptura se alcanza a las 9 horas, mientras que el tiempo de saturación se presenta a las 69 horas, que corresponde a aproximadamente 2.88 días, cercano a 3 días. Para una columna con una altura de lecho de 0.50 m, se observaron tiempos de ruptura y saturación menores. Esto confirma que alturas mayores de columna están asociadas con un aumento en ambos tiempos. Este comportamiento sugiere que una mayor altura del lecho permite una mayor capacidad de adsorción y prolonga el tiempo necesario para alcanzar la saturación del lecho, tal como describe (John.C.Berg, 2010).

4.2.8. Simulación de la adsorción de zinc con altura de lecho 1m

Grafico9. Curva de ruptura con 1m de altura de lecho

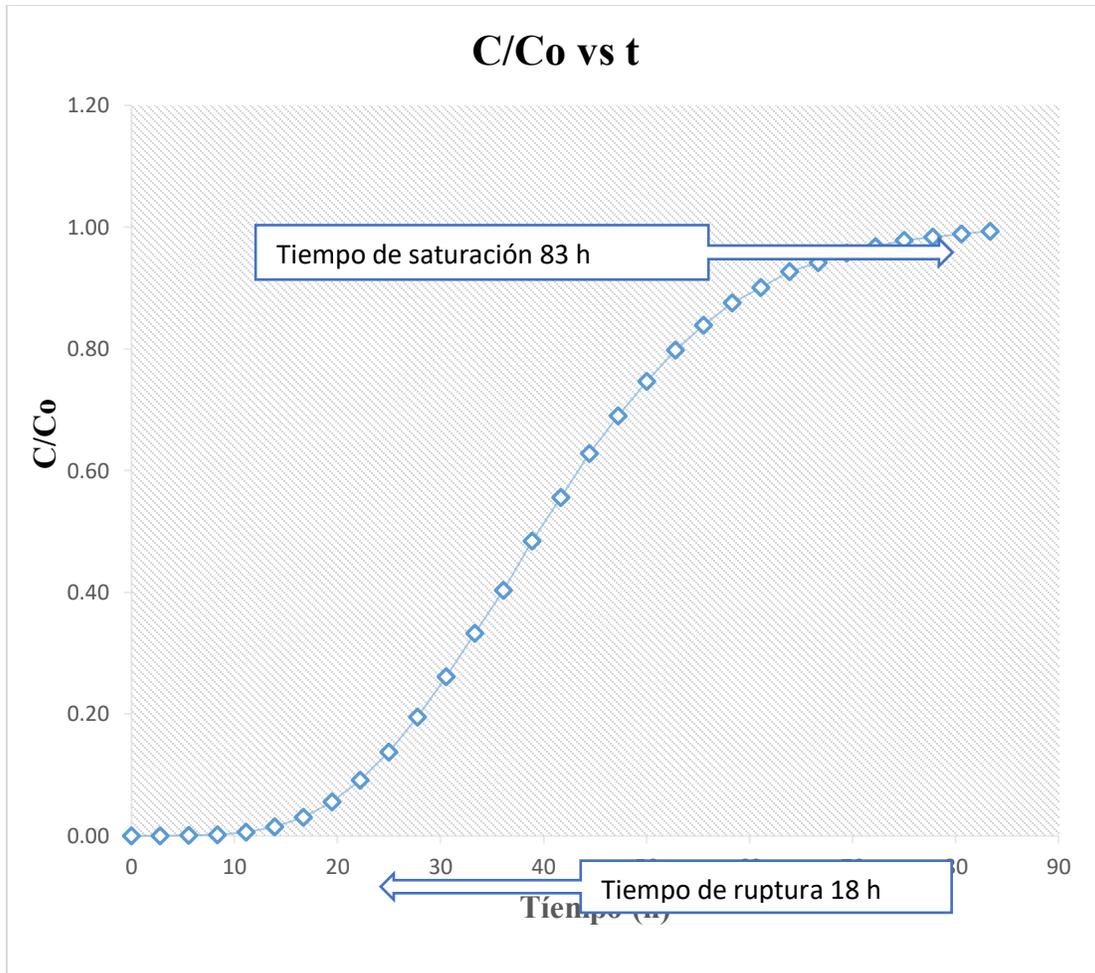


Fuente: Elaboración propia

Como se ilustra en el Gráfico 9, el tiempo de ruptura se alcanza a las 15 horas, mientras que el tiempo de saturación ocurre a las 70 horas, lo que equivale a aproximadamente 2.92 días, cercano a 3 días. Se observa que los tiempos de ruptura para columnas de 0.50 m y 0.80 m son menores en comparación con los de 1m, mostrando diferencias significativas. Sin embargo, en cuanto al tiempo de saturación, la diferencia entre las columnas de 0.80 m y 1m es de solo 1 hora.

4.2.9. Simulación de la adsorción de zinc con altura de lecho 1.20 m

Grafico10. Curva de ruptura con 1.2 m de altura de lecho

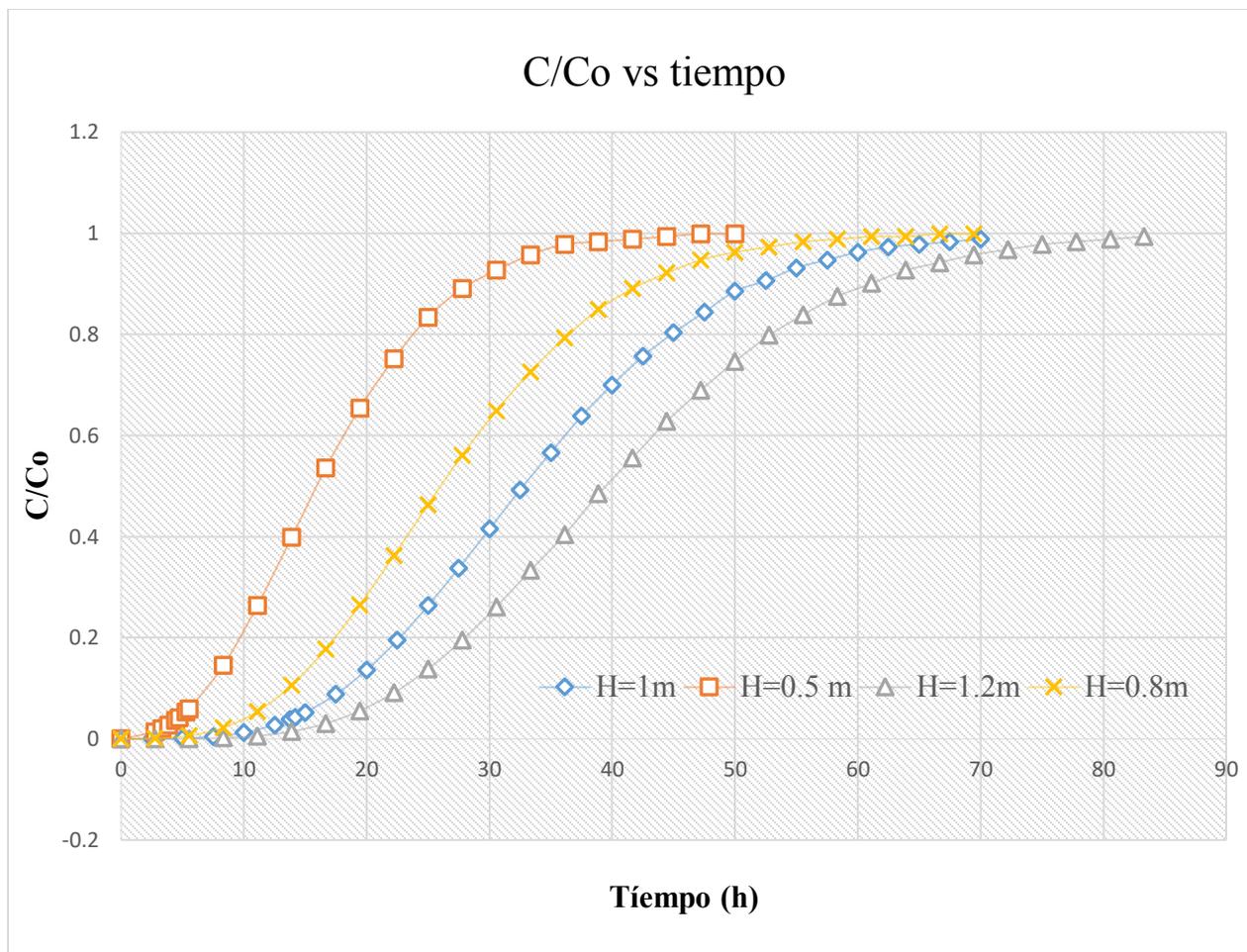


Fuente: Elaboración propia

Como se ilustra en el Gráfico 10, el tiempo de ruptura se alcanza a las 18 horas, mientras que el tiempo de saturación ocurre a las 83 horas, lo que equivale a aproximadamente 3.46 días, cercano a 3.5 días. Para esta altura de lecho de 1.20 m si se observan diferencias significativas en cuanto al tiempo de ruptura y saturación con respecto a las alturas de lecho de 0.50 m, 0.80 m y 1m.

4.2.10. Simulación de la adsorción comparación de alturas de lecho

Grafico11. Alturas de lecho



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 11 se muestra un resumen de los tiempos de ruptura y saturación para distintos valores de altura de lecho a un caudal de 18 mL/s. Los resultados indican que existe una relación directa entre la altura del lecho y los tiempos de ruptura ya saturación; es decir, alturas de lecho menores están asociadas con tiempos de saturación y ruptura más cortos, mientras que mayores alturas prolongan estos tiempos de ruptura y saturación. Esto sugiere que, aunque se pueda lograr mejores rendimientos de adsorción con una altura de lecho de 1.2 metros, los tiempos de operación sería considerablemente más largos.

Para equilibrar la eficiencia de adsorción y la rapidez del proceso, se optó por una altura de lecho de 1 metro como más efectiva para nuestro diseño. Esta elección permite obtener resultados más rápidos sin comprometer significativamente la capacidad de adsorción del material adsorbente.

A continuación, en la Tabla 11, se presenta un resumen del tiempo de ruptura y el volumen de agua acida tratada hasta una concentración final de 5ppm, lo cual proporciona una visión clara del rendimiento y eficiencia de la columna de adsorción.

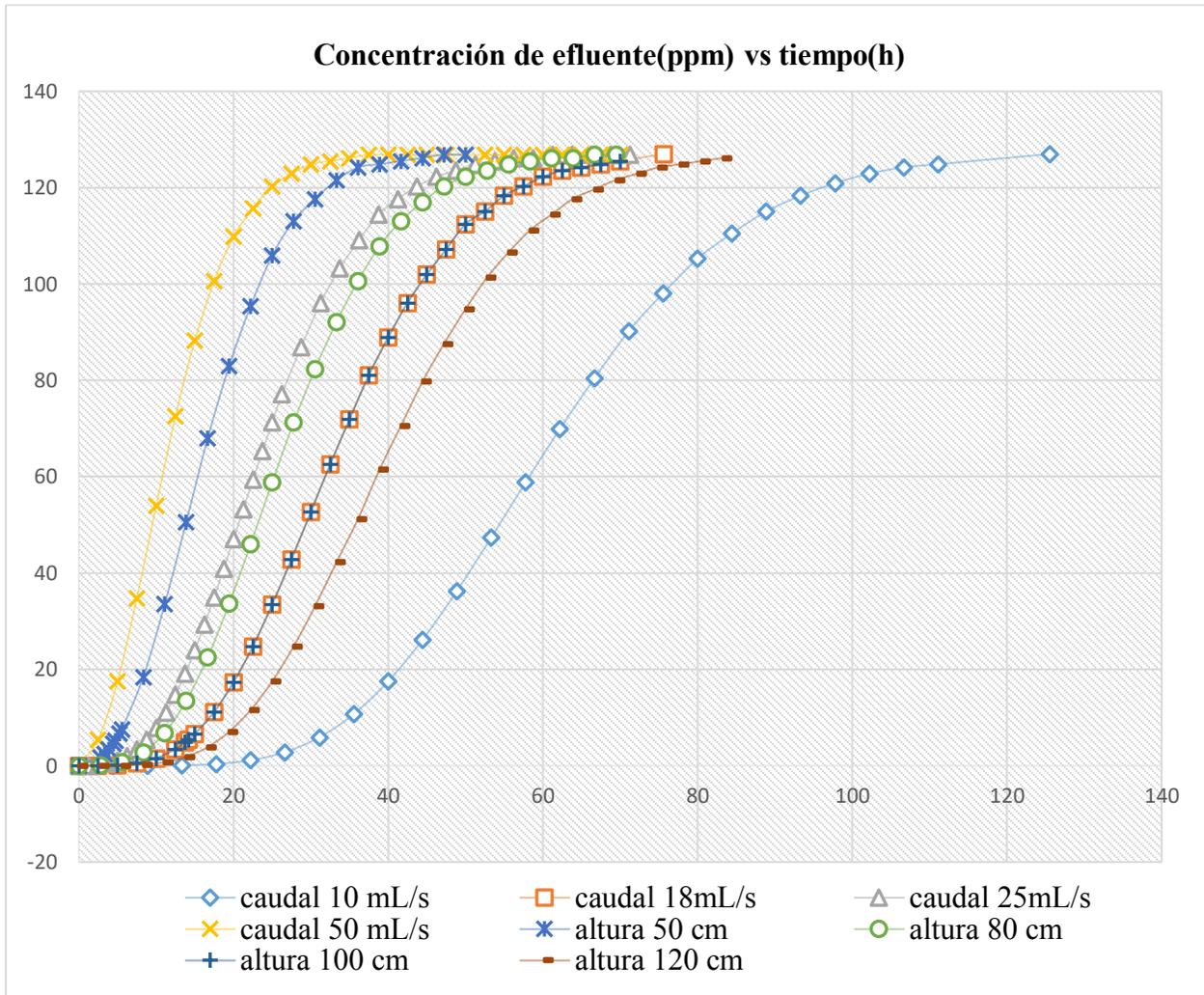
Tabla13. Tiempos de saturación y ruptura para distintas alturas de lecho

parámetro	valor	Tiempo de ruptura(horas)	Tiempo de saturación(horas)	Tiempo a la cual cumple con el reglamento(horas)	Volumen tratado (L)
altura(m)	0.5	5	50	5	324
	0.8	9	69	9	583.2
	1	15	70	15	972
	1.2	18	83	18	1166.4

Fuente: Elaboración propia

4.2.11. Comparación Cambio de caudal y altura de lecho

Grafico12. Concentración de efluente(ppm) vs tiempo(h)



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 12 se muestra la variación de la concentración de zinc (Zn) en el efluente en función del tiempo, analizando el comportamiento del sistema ante cambios en el caudal y la altura del lecho. Se observa que, a mayor caudal, el tiempo de ruptura y saturación disminuye. De manera similar, al aumentar la altura del lecho, los tiempos de ruptura y saturación se incrementan. Este gráfico es clave para la toma de decisiones en el diseño final de la columna de adsorción, destacando que un caudal de 18 mL/s y una altura de lecho de 1m ofrecen tiempos de ruptura y saturación óptimos.

4.3. Esquema de Instalación de la Columna de Adsorción de Lecho Fijo

Con base en los valores previamente analizados de alturas del lecho y caudales volumétricos, se diseñó la columna de adsorción, cuyo esquema de instalación se presenta en la Figura 22. La construcción de esta columna requiere una serie de materiales y accesorios específicos, los cuales se detallan en la Tabla 12.

El diseño ha sido “optimizado” para maximizar la eficiencia de adsorción, considerando tanto la capacidad del lecho adsorbente como las condiciones operativas. La selección cuidadosa de estos elementos garantiza un funcionamiento efectivo y seguro del sistema, permitiendo un tratamiento adecuado del agua contaminada. A continuación, se listan los materiales y componentes necesarios para la instalación completa de la columna de adsorción.

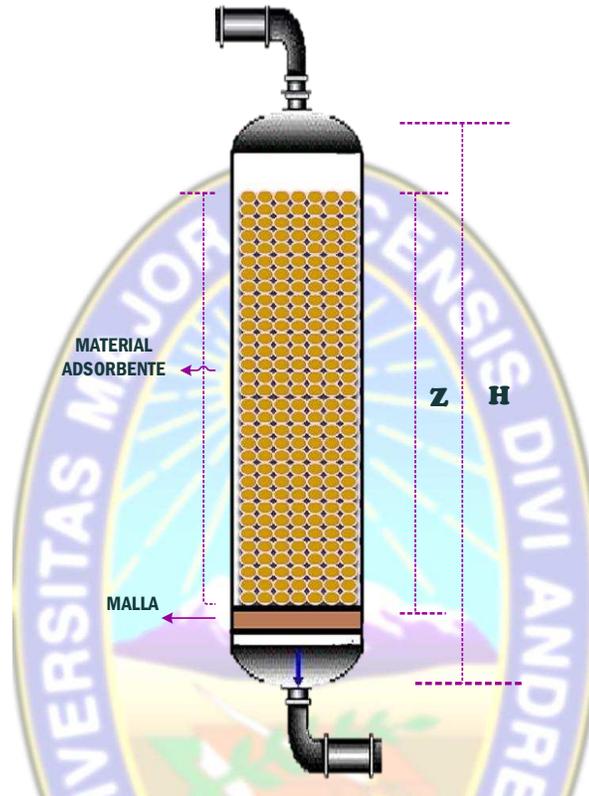
Tabla14. Materiales necesarios para la construcción de la columna de lecho fijo

Ítem	cantidad	Especificación
Material adsorbente	11.1 kg	Nanopartículas de cobre y hierro soportadas en cascara de castaña
Tubería	1	Diámetro 6" PVC
Bomba de peristálticas	1	20 L/h
Unión universal	4	3/8"
Codos de 90° PVC	6	3/8"
Válvula Reguladora	2	3/8"
Miple de reducción	4	1" a 3/8"
Miples	8	3/8"

Fuente: Elaboración propia

La disposición y el empaque del material adsorbente en la columna se ilustran en la Figura 23. Según (García, 2021), se recomienda añadir un 20% adicional de la altura del lecho. Este incremento asegura un margen adecuado para el manejo del material adsorbente y la correcta distribución de flujo de alimentación en la operación del sistema.

Figura21. Ilustración del empaque de Adsorción



Fuente: Elaboración propia

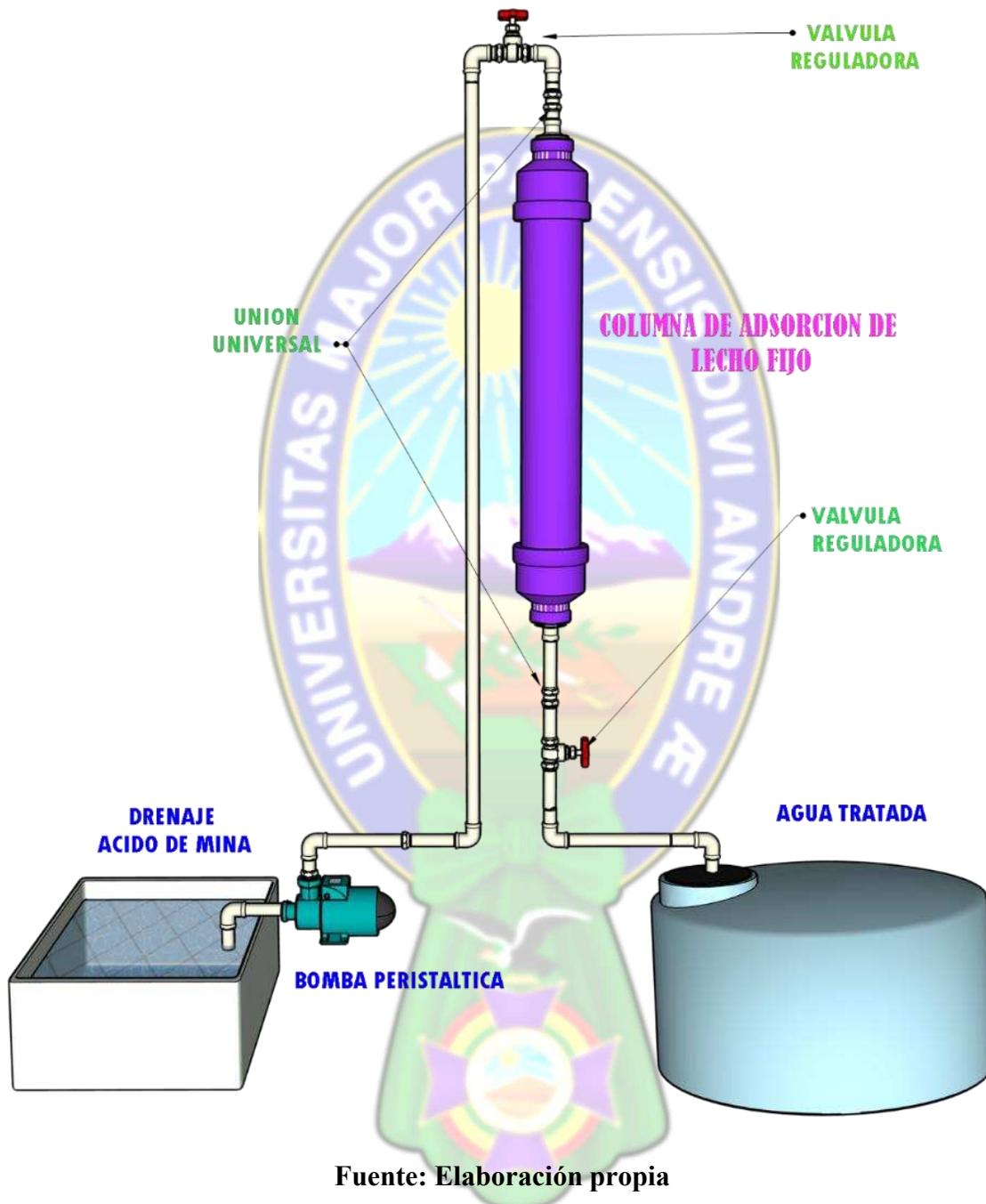
A continuación, se presenta el esquema de instalación de la columna de adsorción diseñada, que puede operar bajo las siguientes condiciones:

Tabla15. Condiciones de operación de la columna diseñada

Dimensiones de la columna	Caudal y concentración	Material adsorbente	Condiciones de operación
D= 0.16 m Altura de lecho = 1 m Altura total de columna =1.2 m	Caudal = 18mL/s Concentración de entrada = 127 ppm Concentración de salida = 5ppm	Densidad aparente=552 kg/m ³ Capacidad de adsorción=9.2mg Zn/g Constante de Langmuir = 0.09 L/mg	Temperatura = 18°C Presión = 495mmHg

Fuente: Elaboración Propia

Figura22. Esquema de instalación de la Columna de adsorción de lecho fijo



Esta columna de adsorción se distingue por su tecnología avanzada, que emplea nanopartículas bimetálicas de cobre-hierro soportadas en cascara de castaña. Este sistema innovador es altamente efectivo en la remoción específica de Zn del drenaje ácido de mina. En una operación continua de

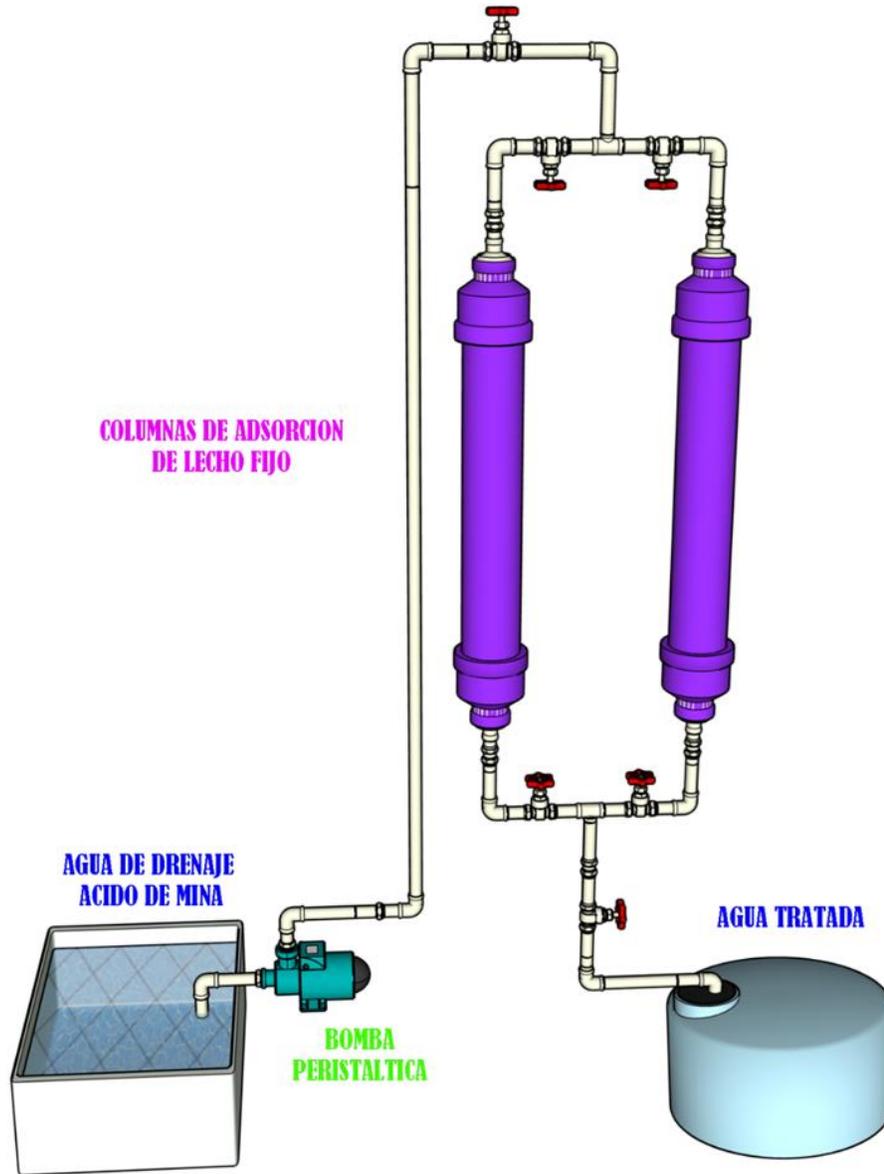
15 horas, la columna puede tratar hasta 567 litros de drenaje ácido, demostrando un 96% eficiencia en el tratamiento, cuando se llega a una concentración de 5ppm de zinc (Zn) en el efluente.

En comparación, el tratamiento con zeolitas propuesto por (Portillo P. , 2017) en un sistema semicontinuo requirió 3 horas para tratar 53 litros de drenaje ácido, logrando una remoción del 99.9% de zinc a partir de una concentración inicial de 105 ppm de Zn. De manera similar, (Sanchez C. E., 2021) en un sistema Bach de 5 etapas obtuvo una remoción del 95% de zinc a partir de una concentración inicial de 115 ppm de Zinc y un volumen de 53 L en un tiempo de 2 horas por etapa. En la presente investigación, utilizando un sistema continuo y partiendo de una concentración inicial de 127 ppm se puede tratar 113.4 L de Drenaje Ácido de Mina en tres horas y una remoción del 99.9%, lo cual demuestra la eficacia y potencial de esta tecnología en la remediación de aguas contaminadas en un sistema continuo.

En el contexto de una economía circular, es fundamental gestionar adecuadamente los residuos generados en el presente proyecto. Por otro lado, los compuestos saturados tras el proceso de adsorción también pueden ser aprovechados de manera alternativa. En lugar de proceder con un proceso de desorción, se podría explorar su uso como aditivos en materiales de construcción, como en la fabricación de hormigón. La literatura sugiere que la combinación de nanopartículas con diferentes materiales puede mejorar significativamente las propiedades foto catalíticas, mecánicas y acústicas del producto final (López et al., 2013).

En el caso de ser implementado este sistema, se sugiere implementar un sistema de dos columnas de adsorción, tal como se ilustra en la Figura 24. En este diseño, una columna funcionara activamente, procesando el flujo de entrada hasta alcanzar una concentración de 5ppm en el efluente. Simultáneamente, la segunda columna se activará de inmediato, permitiendo que la primera columna se someta a un mantenimiento o regeneración sin interrumpir el proceso de tratamiento.

Figura23. Instalación de columnas de adsorción en paralelo



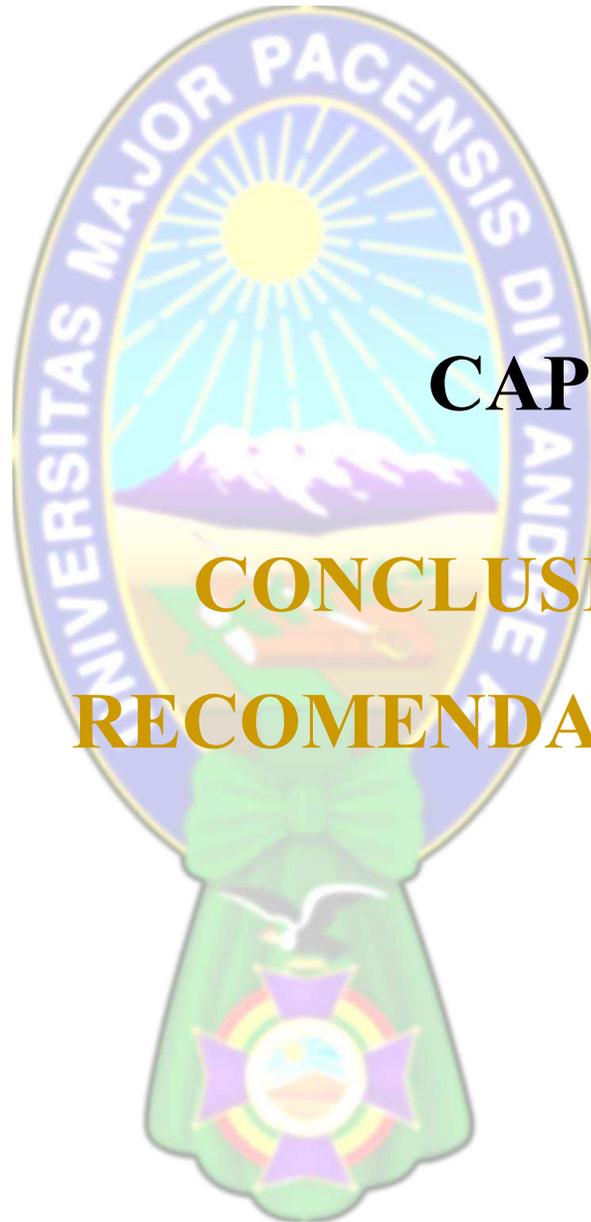
Fuente: Elaboración propia

La operación de dos columnas en paralelo es una estrategia que permite mantener un proceso de adsorción continuo y altamente eficiente. Este diseño garantiza que, mientras una columna se somete a regeneración, la otra continúe en operación, evitando así cualquier interrupción en el flujo del sistema. Como resultado, se maximiza la capacidad de adsorción global, se extiende la vida útil del lecho adsorbente y se minimizan los tiempos de inactividad. Esta configuración es

especialmente beneficiosa en sistemas donde la demanda de tratamiento es constante, proporcionando una mayor robustez y confiabilidad operativa.

Entre las principales ventajas de este esquema se incluyen el flujo continuo, la mejora en la eficiencia operativa al mantener siempre una columna activa, y la reducción de paradas no planificadas, lo que optimiza la productividad del sistema. No obstante, también presenta ciertas desventajas, como una mayor inversión inicial debido al costo de instalación y equipamiento, un mayor espacio requerido en la planta, un mantenimiento más complejo, y un aumento en el consumo energético asociado a la regeneración de las columnas.

En términos de capacidad de tratamiento del drenaje ácido de mina, la implementación de un sistema de columnas en paralelo permite operar continuamente e incrementar significativamente el volumen tratado. Si una sola columna es capaz de procesar 567 litros de drenaje en 15 horas, al operar en continuo se puede duplicar la capacidad, alcanzando un tratamiento de hasta 1234 litros en un día y medio. Este proceso se optimiza alternando la operación de las columnas: cuando la concentración de zinc (Zn) en el efluente de una columna alcanza 5 ppm, esta se cierran las válvulas de alimentación y salida para regenerarse, mientras la segunda columna entra en operación, garantizando la continuidad del tratamiento sin interrupciones. Este diseño asegura una mayor eficiencia en el procesamiento y maximiza el tiempo de operación efectiva del sistema.



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La selección de variables y parámetros fue clave para el diseño eficiente de la columna de adsorción. Con base en estos, se diseñó la columna de lecho fijo y se realizaron simulaciones. Este enfoque garantiza que los parámetros elegidos y criterios de diseño optimicen el rendimiento del sistema, respaldados por datos y recomendaciones de la literatura técnica.
- El modelo matemático, basado en un balance de materia, permitió analizar la variación de concentraciones a lo largo de la altura del lecho en función del tiempo, alcanzando una concentración límite de 5 ppm, conforme al reglamento para cuerpos de agua de clase C.
- Se llevó a cabo la simulación del proceso de adsorción, en la cual se variaron el caudal de alimentación y la altura del lecho, permitiendo la determinación de los tiempos de ruptura y saturación. Los resultados evidenciaron que un incremento en el caudal reduce los tiempos de ruptura y saturación, mientras que un aumento en la altura del lecho los prolonga. Con base en este análisis, se estableció un caudal óptimo de 18 mL/s y una altura de lecho de 1 m para el diseño de la columna. Este análisis resalta la importancia de un ajuste preciso de estos parámetros para maximizar tanto la eficiencia como la velocidad del proceso de adsorción.
- La columna de adsorción diseñada en este proyecto, utilizando un nanocomposito que tiene un avance tecnológico al ser selectivo en cuanto a adsorción de un metal específico (Zn) este permite tratar 567 L de agua contaminada con drenaje ácido de mina en 15 horas de operación continua, con una eficiencia del 96%. En comparación, Portillo (2017) y Sánchez (2021), haciendo uso de un sistema como lo es la columna se demuestra su eficacia y potencial para la remediación de aguas contaminadas en un sistema continuo.

5.2. RECOMENDACIONES

- Desarrollar un estudio experimental detallado de la columna de adsorción de lecho fijo utilizada en este proyecto, considerando adicionalmente el análisis de variables como la caída de presión, los mecanismos de transferencia de masa interna, la porosidad del material adsorbente y el efecto de variaciones en el diámetro de la columna sobre el rendimiento del proceso.

- Realizar un análisis exhaustivo del proceso de desorción para evaluar la capacidad de regeneración del material adsorbente, investigando además posibles aplicaciones industriales o comerciales del zinc recuperado.
- Evaluar la adsorción y desorción de otros metales pesados, como cobre y hierro, utilizando el nanocomposito basado en nanopartículas de Fe/Cu soportados en cáscara de castaña, con el objetivo de ampliar las aplicaciones potenciales del sistema.
- Desarrollar un estudio de escalamiento del sistema de adsorción que incluya factores como la cinética de adsorción, la transferencia de masa externa e interna, y la distribución de flujo en columnas de mayor tamaño. También es importante evaluar el consumo energético, el costo operativo, la durabilidad del adsorbente bajo condiciones prolongadas y el impacto ambiental del proceso a mayor escala. Considerar estos aspectos garantizará un escalamiento eficiente y viable desde el punto de vista técnico y económico.

BIBLIOGRAFÍA

A.K.Jha. (2019). *Design and Applications of Nanocomposites: A Review*.

Aduviri, O. (2006). *Instituto Geologico y Minero de España direccion de recursos Minerales y Geoambiente*. Madrid.

Alberto, B. (8 de septiembre de 2023). *Historia de mineros*. Obtenido de <https://boliviadescubre.com/historia/historia-de-mineros>

Anjum, M. (2017). A review of advancements in nanoremediation technology for the treatment of contaminants in water: Effectiveness, limitations, and future directions. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(4), 984-998.

Aranguren, M. M. (octubre de 2016). Lineamientos de Acción para la mejora Ambiental del Pasivo Minero de Milluni, vertiente occidental de la cordillera Real, Bolivia. pág. 1.

Avila, E., Puello, E., & Castilla, P. (2019). *Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Equipo de Adsorción con dos columnas a escala de Laboratorio*. Cartagena: Universidad de San Buenaventura, Facultad de ingeniería, Arquitectura, Artes y Diseño, Programa de Ingeniería Química.

- Bach, N. A. (2018). *Evaluación de las propiedades Antibacterianas de nanopartículas de cobre sintetizadas a partir de CuSO₄ y extracto de eucalipto*. Arequipa,Peru.
- Bañon, J. H. (2017). *Diseño de un sistema de adsorción en carbón activado para la eliminación de cromo hexavalente en disolución acuosa*. Universidad Politecnica de valencia.
- Basso, M., & Cukierman, A. (2003). Empleo de un biosorbente para el tratamiento de agua. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, VII(2)*.
- Bernal, M. D., & Aguirre, D. N. (2022). *Escalamiento columna de adsorción para la remoción de cromo en las aguas residuales de la industria de Curtiembre por medio de la cascara de banano*. Bogota D.C: Universidad de America, Facultad de Ingenieria.
- Cabezas, C. (2018). Estimación del potencial energético de los residuos de la cadena de valor del fruto de la castaña (*Bertholletia Excelsa*) en la región Madre de Dios. *Universidad Nacional Agraria*.
- Calero, B., Lara, M., & Perez. (2018). *Eliminación de Ni(II) presente en medios acuosos mediante biosorción con cascara de piña en columnas de lecho fijo. Efecto de la altura de relleno*. Granada, España: Facultad de Ingenieria, Universidad de Granada.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction*.
- Campanini G., O. (2017). Agua y Minería en Bolivia ¿Riesgo Lejanos? *DELIBERAR*, 39.
- Campanini, O. (2017). Agua y minería en Bolivia ¿Riesgos lejanos? 34-44.
- Cardenas, S. S., & Ortega, R. J. (2015). *Modelamiento y Simulación de una columna de Adsorción de Lecho fijo para la remoción de Cr VI de soluciones acuosas utilizando aserrín como material adsorbente*. Arequipa-Peru.
- Carlos. (19 de septiembre de 2023). *Minería en Bolivia historia y Actualidad*. Obtenido de <https://www.promine.com/es/blog-es/mineria-en-bolivia-historia-y-actualidad/>
- Casarin, J. (2014). Adsorción de iones metálicos utilizando la cáscara de semillas de castaña de Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K) como biosorbente (Tesis de Maestría). *Universidad Estatal del Estado de Paraná*.
- Castellar, O. (2012). *Remoción de Pb II en disoluciones acuosas sobre carbon activado*. Colombia, Bogota : Departamento de Quimica, Universidad Nacional de Colombia.
- Castello, T. (2017). *Diseño de Un Sistema de Adsorción Para La Eliminación de Colorantes Presentes En Disolución Acuosa*.

- Castillo, R. (2001). *Desarrollo de un programa para la simulacion del proceso de remocion de cromo III en columnas de adsorcion de lecho fijo*. Carabobo: Universidad de Carabobo Facultad de Ingenieria.
- Castro, J. (2017). *Integracion de los procesos heterogeneos en el analisis de la cinetica de produccion de biodiesel usando enzimas inmovilizadas en un reactor por lotes*. Bogota, CUN- Colombia.: Departamento de procesos y energia, Universidad Nacional de Colombia.
- Centeno, J. E. (2016). *Drenajes Acidos de Mina alternativas de tratamiento*. Oruro-Bolivia.
- Chaparro, L. T. (2015). *Drenajes Acidos de Mina. Formacion y Manejo*. ESAICA.pp.Vol1 n°1. pp 53-57.
- Crittenden, J. C., & Trussell, R. D. (2012). *Water Treatment-Principles and Design*. John Wiley / Sons, Inc.
- Deber, E. (12 de abril de 2017). Pasivos Ambientales, que deja la mineria son nocivos. *El Deber*.
- Diaz, V. C. (2012). Breve historia de la mineria en Bolivia. 5.
- Dima, J. B., Mandelman, I., Zaritzki, N., & Ferrari, M. A. (diciembre de 2022). Estudio de las curvas de adsorcion en una columna de lecho fijo.
- Estrada, S. L., Garcias, M. C., Perez, B. C., & Cantu, s. L. (2023). *Nanomateriale: Conceptos, aplicacion en nanoterapia y regulaciones*. Mexico.
- Figueroa, & Moreno, H. (2015). *Equilibrio, Termodinamica y modelos cineticos en la adsorcion de rojo 40 sobre tuza de maiz*. Medellin, Colombia: Revista de Ingenieria, Universidad de Medellin voll4.
- García, G. (7 de Julio de 2023). *THE FOOD TECH*. Obtenido de <https://thefoodtech.com/maquinaria-para-ensado-y-procesamiento/la-nanotecnologia-aplicada-a-envases-alimentarios/>
- Garcia, S. F. (2021). *Diseño de un sistema de Adsorcion a base de arcilla pra la remocion de plomo*. Aguas Calientes- Mexico: Universidad Autonoma de aguas calientes .
- GENERAL, C. P. (2014). *Informe de auditoria sobre el desempeño Ambiental respecto de la Contaminacion Hidrica en la cuenca del rio Katari y la Bahia en la cuenca del rio Katari y la Bahia de Cohana*.
- Georgin, J., Marques, B., Peres, E., Allasia, D., & Dotto, G. (Enero de 2018). Biosorción de colorantes catiónicos con cascara de castaña Pará (*Bertholletia excelsa*). *Water Science and Technology*, 1612-1621.
- Gomez, V. F. (2020). *Nanoparticulas Metalicas y sus aplicaciones*.

- Gupta, V. S. (2009). "Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review". *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342. Portugal.
- Gwency, W. (24 de Febrero de 2017). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-017-0439-3>.
- Herrmann, J. M. (2005). Heterogeneous photocatalysis: State of the art and present applications. *Topics in Catalysis*, 34(1-4), 49-65.
- Hussain, F., Okamoto, M., & Russell, G. (2006). *Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: An overview*. Japon.
- Ing. Zamorra, E. G. (2022). *Formacion, prevencion e innovacion en el tratameinto de drenajes acidos en operaciones mineras*. Oruro-Bolivia: Universidad Tecnica de Oruro.
- J.J.Kim. (2016). *Scalability of Nanocomposite Production: Challenges and Solutions*.
- Jamkhandea, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., & Kalaskard, M. G. (2019). Síntesis de nanopartículas metálicas: una descripción general de los métodos de preparación, ventajas y desventajas, y aplicaciones. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*.
- Jimenez, P. M. (2020). *DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN PILOTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIOMASA MODIFICADA CON NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL TEXTIL*. BOGOTA : UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA.
- John.C.Berg. (2010). "Principles of Adsorption and Adsorption Processes". CRC Press.
- Larrea, E., & Arratia, c. (5 de junio de 2023). *Bolivia*. Obtenido de <https://internetbolivia.org/nota-de-opinion/el-rol-de-bolivia-en-la-cadena-de-extraccion-de-minerales-para-la-industria-tecnologica-y-los-impactos-en-el-medio-ambiente/>
- Larry, E. J. (2023). *Introduccion a los minerales, Exceso de cinc*. University of Arkansas for Medical Sciences.
- Lineres, J. (2018). Remoción de iones plomo (II) de soluciones sintéticas mediante el biosorbente obtenido de la cáscara de castaña (*Bertholletia Excelsa*). (Tesis de Maestría). *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*.
- Liu, J., Jiang, J., Meng, Y., Aihemaiti, A., Xu, Y., Xiang, H., . . . Chen, X. (2020). Preparación, aplicación ambiental y perspectiva de nanopartículas metálicas con biochar: una revisión. *Journal of Hazardous Materials*.
- Liu, X. (2016). Magnetic nanoparticles for removal of heavy metals from water: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 303, 246-259.

- López, G., Morales, R., Olea, O., Sánchez, V., Trujillo, J., Valera, V., & Vilchis, A. (2013). *Nanoestructuras metálicas; síntesis, caracterización y aplicaciones*. (U. A. México, Ed.) Editorial Reverte.
- M.R.Khedher. (2019). *Nanocomposites for Environmental Remediation: A Review*.
- Marimon. (2018).
- Marin, G., & Rodrigo, S. (2023). *Perspectivas en la utilización de residuos de la industria de la castana*. La Paz-Bolivia: Instituto de Investigaciones Químicas.
- Martinez, E., Pajaro, E., & Castilla, P. (2019). *Diseño, Construcción de un Equipo de Adsorción con dos columnas a escala Laboratorio*. *minus.net/mineria-sustentable*. (2 de Julio de 2018).
- Miranda, A., Arancibia, H., & Quispe, R. (2010). Patrimonio Geológico y Minero de la región de Milluni en La Paz Bolivia.
- Navarro, R. D., & Lopez, G. H. (01 de junio de 2023). *Plastics Technology Mexico*. Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/articulos/nanocompuestos-polimericos-redefinen-las-aplicaciones-de-los-plasticos>
- Ojeda, G., Arias, G., & Sgroppo, S. C. (12 de Junio de 2020). *Revista interdisciplinaria en nanociencia y nanotecnología*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912019000200302&script=sci_arttext
- P.H.Chiu. (2017). *Economic Feasibility of Nanocomposites: A Review of Challenges and Opportunities*.
- Pacheco Soliz, J. (2023). *Evaluación Técnica de la Eficiencia de Remoción de Materia Orgánica de Agua Residual proveniente del servicio Nacional Textil-Senatex en un biorreactor UASB a escala Laboratorio*. La Paz -Bolivia.
- Paiz, F., & Mendez Hernandez, M. H. (octubre de 2021). *repositorio.unan*. Obtenido de <https://repositorio.unan.edu.ni/17165/>
- Patel, H. (2021). Comparison of batch and fixed bed column adsorption: a critical review. *Internacional Journal of Enviromental Science and Technology*. (págs. 1-18). <https://doi.org/10.21.66/WST.2020.455>.
- Portillo, M. E. (2017). *ESTUDIO DE LAS CONDICIONES PARA EL TRATAMIENTO COMBINADO FISICOQUIMICO Y BIOLOGICO DE LOS DRENAJES ACIDOS DE MINA PROVENIENTES DE LA LOCALIDAD DE MILLUNI, LA PAZ. LA PAZ BOLIVIA*.

- Portillo, P. (2017). Estudio de las condiciones para el tratamiento combinado fisicoquímico y biológico de los drenajes ácidos de mina (DAM) provenientes de la localidad de Milluni La Paz. *Proyecto de grado, UMSA*. La Paz, Bolivia.
- R.K.Sinha. (2019). *Nanocomposites for Water Treatment: A Review of Technologies and Applications*.
- Robert H. Perry, D. W. (2000). *PERRY MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO TOMO IV SEXTA EDICION*.
- S.H.Kim. (2020). *Nanocomposites: A Review of Recent Advances and Applications*.
- Sanchez, C. E. (2021). *Obtencion de Nanoparticulas de Fe/Cu, soportadas en cascara de castaña, para la remocion de metales del DAM provenientes de Milluni, La Paz*. La Paz- Bolivia.
- Sanchez, M. (2020). *Stability and Aggregation Issues in Nanocomposites: A Review*.
- Sanchez, R., & Martinez, H. (2014). *Inmovilizacion de enzimas lignoceluliticas en nanoparticulas magneticas*. *Quimica Nova*, Vol 37, #3.
- Sinha, S. e. (2015). Nanotechnology in the remediation of heavy metals: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(21), 16866-16875.
- Tapia, A. A., & Zanella, R. (2020). *Las nanoparticulas bimetalicas y algunas de sus aplicaciones*. Mexico . Obtenido de cielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912017000200072
- Tejada, C., & Villabona, Á. (Junio de 2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 18(34), 109-123.
- Textos Científicos*. (25 de Junio de 2006). Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/columnas-adsorcion>
- Trujillo Reyes, J., Sánchez Mendieta, V., Colín Cruz, A., & Morales Luckie, R. (2010). Eliminación de azul índigo en solución acuosa usando nanopartículas de Fe/Cu y compuestos de nanoaleaciones C/Fe-Cu. *Water, Air, and Soil Pollution*, 307-317.
- Vatavuk, W., Klotz, W., & Stallings, R. (2000). *Adsorbedores*. EE.UU.: Innovative Strategies and Economics Group, OAQPS.
- Weber, W., & Edward, S. (1987). *Simulation and Desing models for adsorption processes* *Environmental Science and Technology*. Environmental Science and Technology.
- Yazdani, M., & Kaghazchi, T. (2010). "Adsorption of heavy metals from water using activated carbon from apricot stone: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies". *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 29(1), 1-10.

Zhang, X., Li, Y., Yang, L., & Wang, W. (2011). Impactos de la minería y fundición de plomo / zinc en el medio ambiente y la salud humana en China. *Environmental Monitoring and Assessment*.

Zhang, Z. e. (2014). Photocatalytic removal of hazardous gaseous pollutants by TiO₂-based catalysts: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 26(11), 2057-2074.

ANEXOS

Anexo 1. PROGRAMA DE MATLAB

```
close all
% Parámetros
U0 = 0.00000833; % Velocidad de flujo (m/s)
b = 0.04; % Constante de Langmuir (L/mg)
epsilon = 0.4; % Porosidad
rho_ads = 552; % Densidad del adsorbente (g/L)
qm = 9.2; % Capacidad máxima de adsorción (mg/g)
zmax = 1; % Longitud máxima de la columna (m)
tmax = 180000; % Tiempo máximo de simulación (s)
Nz = 100; % Número de puntos espaciales
Nt = 500; % Número de puntos temporales

% Discretización
dz = zmax / (Nz - 1);
dt = tmax / (Nt - 1);
z = linspace(0, zmax, Nz);
t = linspace(0, tmax, Nt);

% Inicializar la matriz de concentración
C = zeros(Nz, Nt);

% Condiciones iniciales
C(:,1) = 127; % Concentración inicial en ppm
C(1,:) = 127; % Concentración (entrada)
C(end,:) = 5; % Concentración (salida)

% Método de diferencias finitas
for n = 1:Nt-1
    for i = 2:Nz-1
        % Calcular la derivada espacial usando diferencias finitas
        dCdz = (C(i+1,n) - C(i-1,n)) / (2 * dz);

        % Calcular el valor de alpha en función de la concentración actual
        alpha = 1 + (rho_ads * (1 - epsilon) * qm * b) / (epsilon * (1 + b * C(i,n))^2);
```

```

        % Actualizar la concentración usando diferencias finitas explícitas
        C(i,n+1) = C(i,n) + dt * (U0*5.3 / epsilon * dCdz / alpha);
    end

    % Aplicar condiciones de frontera
    C(1,n+1) = 127; % Concentración en el extremo izquierdo (entrada)
    C(end,n+1) = 5; % Concentración en el extremo derecho (salida)
end

% Crear malla para tiempo y posición
[T, Z] = meshgrid(t, z); % Crear malla de tiempo y posición

% Verificar las dimensiones
disp(['Dimensiones de T: ', num2str(size(T))]);
disp(['Dimensiones de Z: ', num2str(size(Z))]);
disp(['Dimensiones de C: ', num2str(size(C))]);

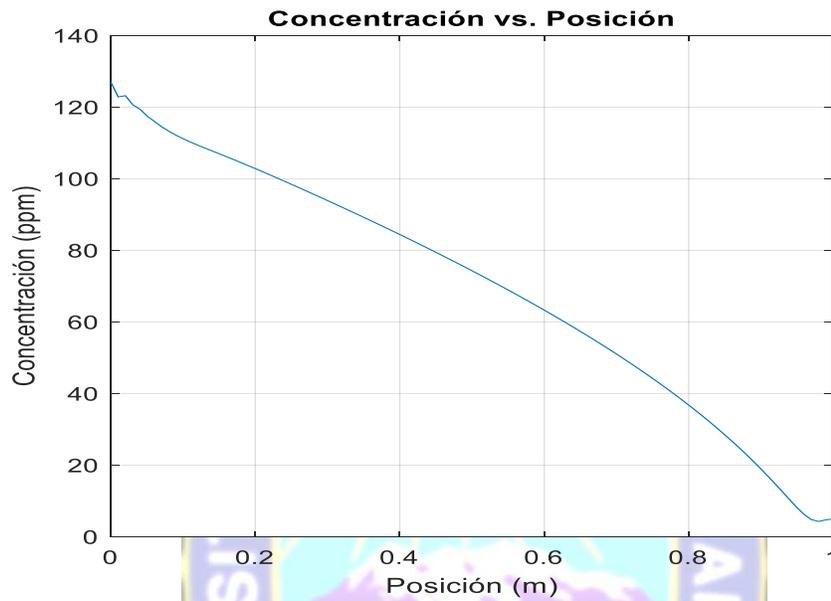
% Graficar la malla
figure;
mesh(T, Z, C); % Usar C en lugar de C'
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Posición (m)');
zlabel('Concentración (ppm)');
title('Distribución de Concentración en la Columna de Adsorción');

% Gráfico de concentración vs. tiempo en varios puntos a lo largo de la columna
figure;
hold on;
for i = round(linspace(1, Nz, 5)) % Elegir puntos de muestra a lo largo de la columna
    plot(t, C(i, :), 'DisplayName', sprintf('Posición z = %.2f m', z(i)));
end
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Concentración (ppm)');
title('Concentración vs. Tiempo en Diferentes Posiciones de la Columna');
legend;
grid on;

% Gráfico de concentración vs. posición en un tiempo fijo
figure;
time_index = round(Nt / 2); % Seleccionar un instante de tiempo
plot(z, C(:, time_index));
xlabel('Posición (m)');
ylabel('Concentración (ppm)');
title('Concentración vs. Posición');
grid on;

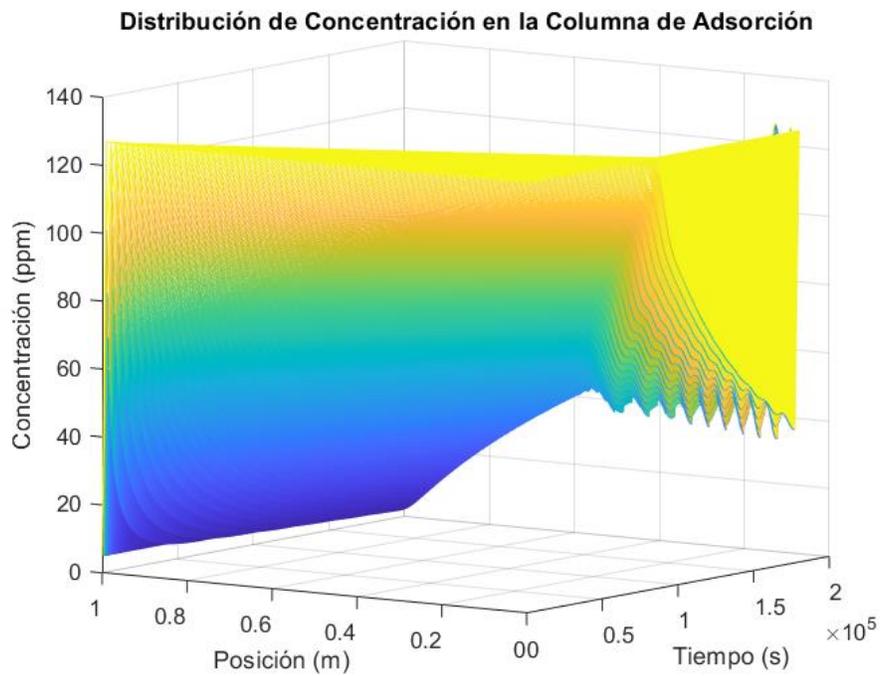
```

Anexo 2. CONCENTRACIÓN VS LONGITUD DE LECHO



Fuente: Grafico de Matlab

Anexo 3. CONCENTRACIÓN VS TIEMPO Y LONGITUD DE LECHO



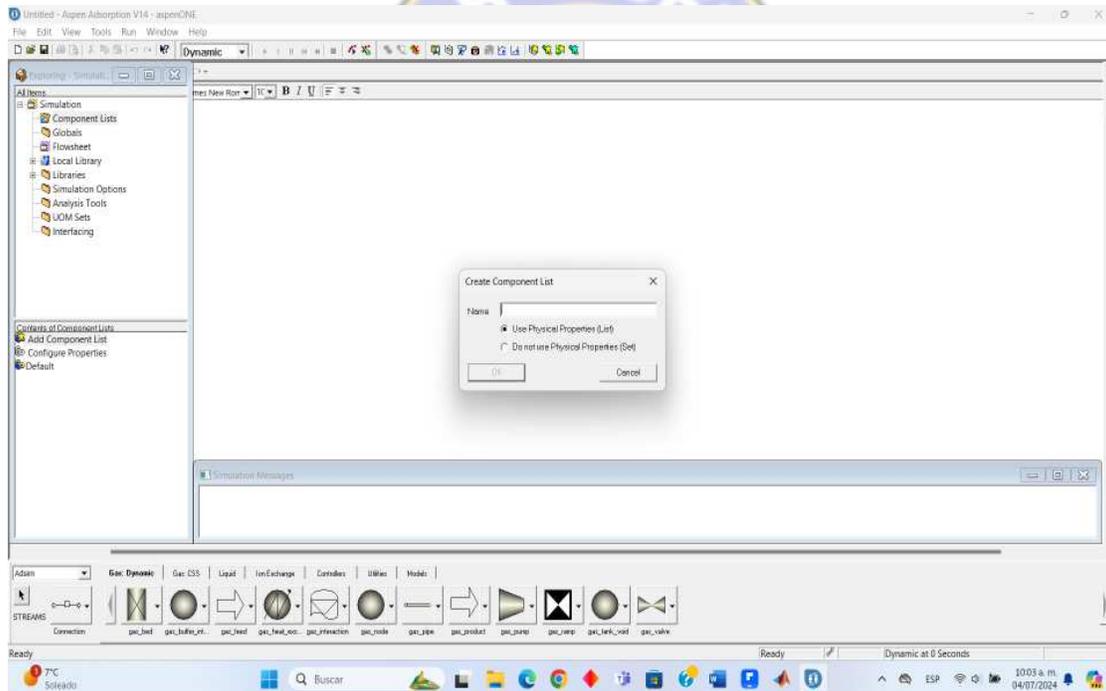
Fuente: grafico de Matlab

Anexo 4. PROGRAMA DE SIMULACION

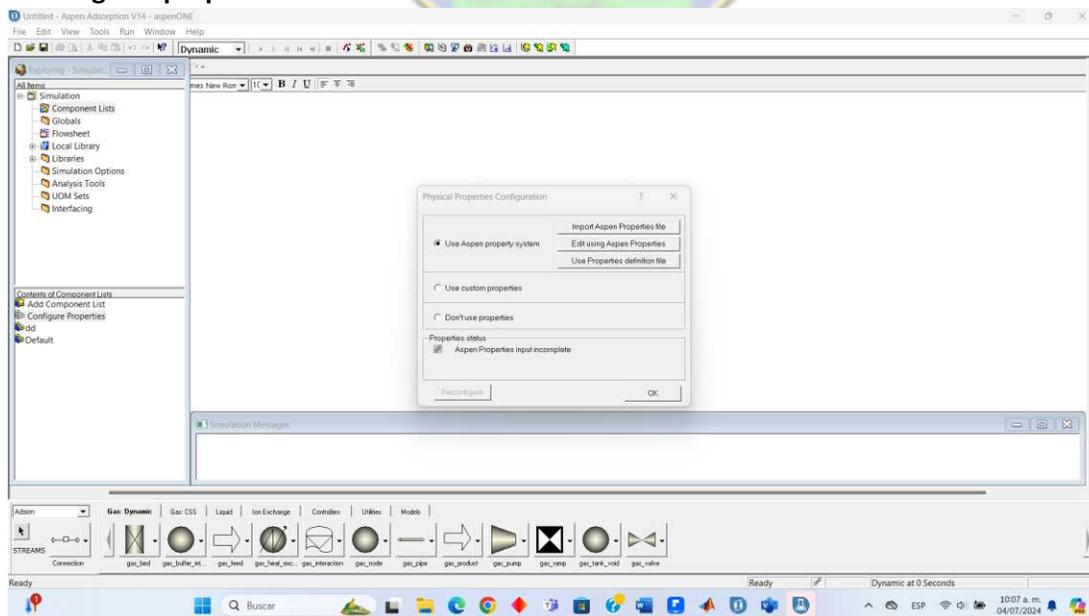
- Dar inicio en: Aspen Adsorción V.4



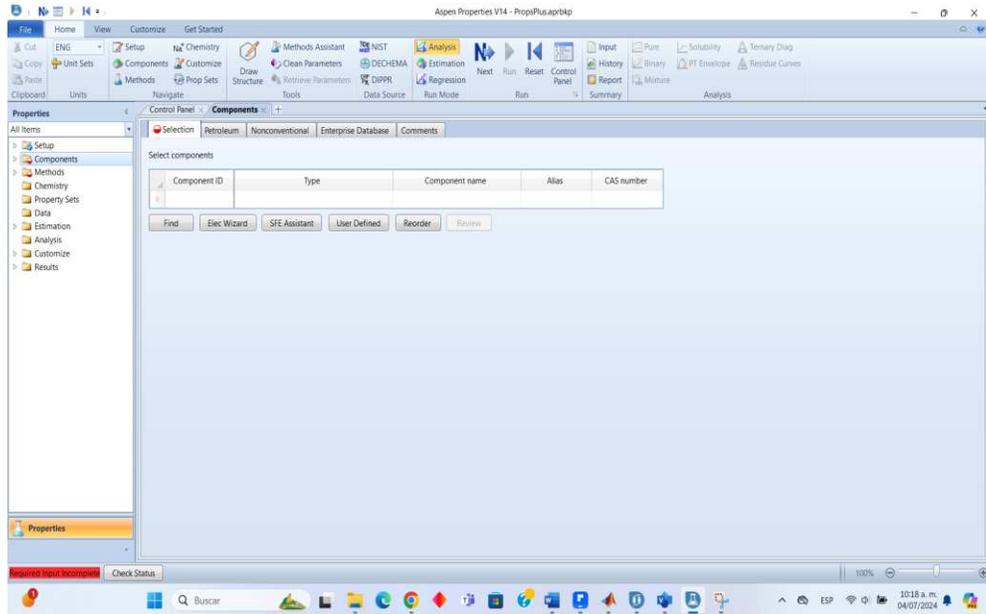
- Añadir componentes



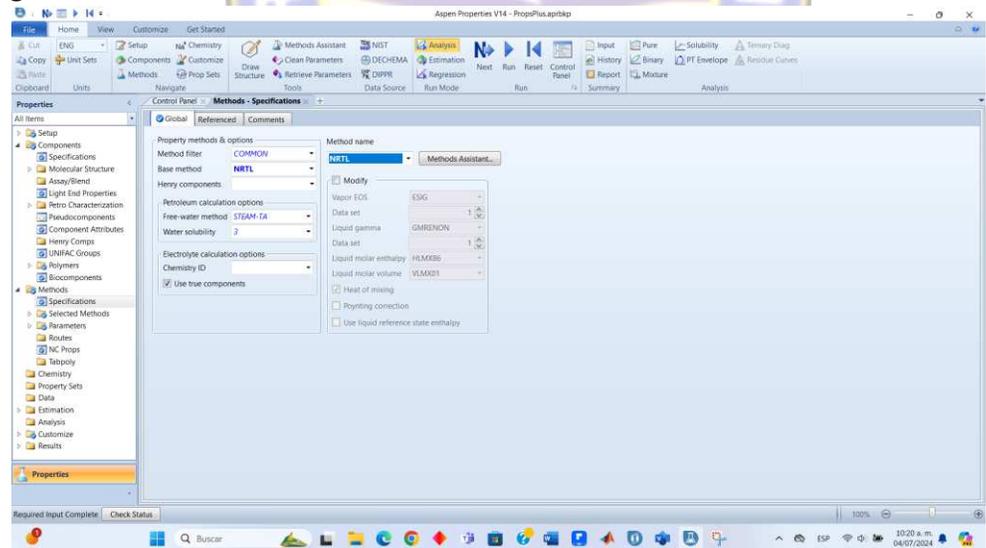
- Configurar propiedades



- **Agregar componentes del flujo**

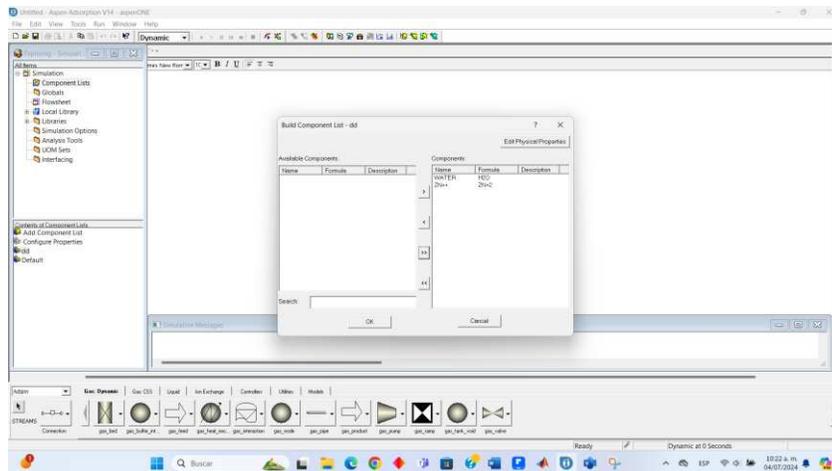


- **Elegir el método**

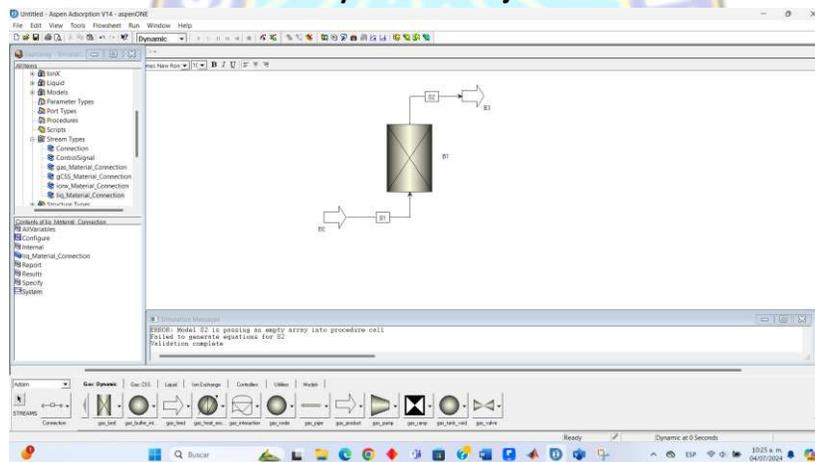


- **Añadir los componentes de flujo para la columna**

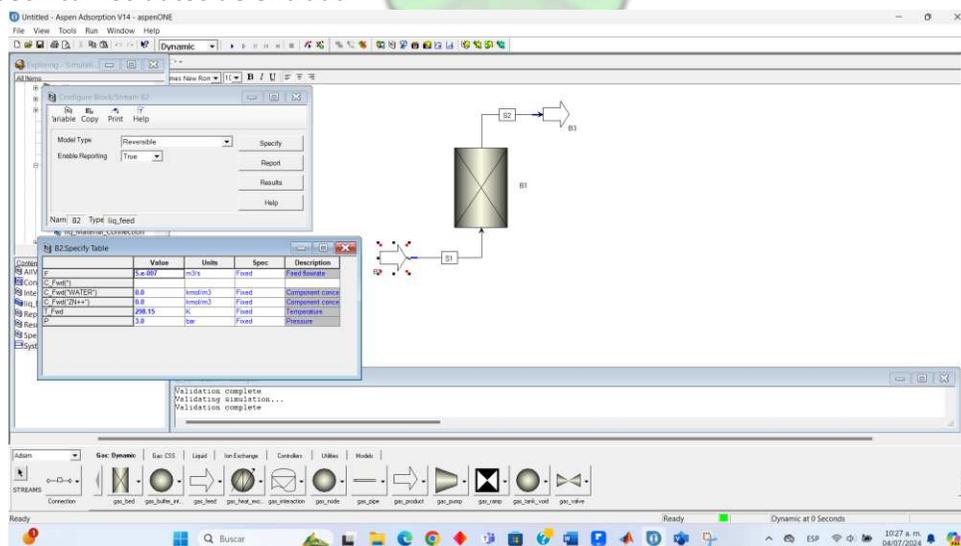




- Estructurar la columna con entradas y salida de flujo



- Especificar los datos de entrada



- Especificar las condiciones de trabajo de la columna, así como sus dimensiones y propiedades del lecho

The screenshot shows the Aspen Adsorption V14 interface. The main window displays a column (B1) with a liquid bed. Two configuration windows are open:

- Configure Block/Stream B1:** Shows "Number Of Layers Within Bed" set to 1 and "Assumed Bed Orientation" set to "Vertical High Inlet".
- Configure Block/Stream B1.Layer(1):** Shows "Isotherm Assumed For Layer" set to "Langmuir 1".

A "Specify Table" window is also open, displaying the following properties:

Property	Value	Units	Description
Htb	1.0	m	Height of adsorbent layer
Db	1.0	m	Internal diameter of adsorbent layer
ε _p	0.4	m ³ void/m ³ bed	Intra-particle voidage
ρ _{bed}	1000.0	kg/m ³	Solid density
E _d (*)			
E _d (WATER)	1.e-005	m ² /s	Constant Dispersion Coefficient
E _d (Zn++)	1.e-005	m ² /s	Constant Dispersion Coefficient
MTC(*)			
MTC(WATER)	1.0	1/s	Constant mass transfer coefficients
MTC(Zn++)	1.0	1/s	Constant mass transfer coefficients
IP(*)			
IP1(WATER)	1.0	n/a	Isotherm parameter
IP1(Zn++)	1.0	n/a	Isotherm parameter
IP2(WATER)	1.0	n/a	Isotherm parameter
IP2(Zn++)	1.0	n/a	Isotherm parameter
Direction	0.0	n/a	Specified flow direction

- Resultados

The screenshot shows the Aspen Adsorption V14 interface during a simulation. The main window displays a column (B3) with a liquid bed. Two windows are open:

- Configure Block/Stream B3:** Shows "Model Type" set to "Reversible" and "Enable Reporting" set to "True".
- B3 Results Table:** Shows the following data:

Property	Value	Units	Description
F	5.e-007	m ³ /s	Sink flowrate
X ₁ Fwd(*)	0.5	kmol/kmol	Molefractions
X ₁ Fwd(WATER)	0.5	kmol/kmol	Molefractions
C ₁ Fwd(*)	0.0	kmol/m ³	Component concentration
C ₁ Fwd(WATER)	0.0	kmol/m ³	Component concentration
T ₁ Fwd	298.15	K	Temperature
P	3.0	bar	Boundary pressure
H ₁ Fwd	26.0	kJ/kmol	Enthalpy

A "concentracionvs tiempo Plot" window is also open, showing a graph of concentration (kmol/m³) versus Time (Seconds). The y-axis ranges from 0.0 to 1.0, and the x-axis ranges from 0.0 to 10.0. The plot area is currently blank.

Anexo 5. RESULTADOS DE LA SIMULACION VARIANDO CAUDALES

Tabla16. Concentraciones del efluente Caudal 10mL/s

t(h)	Cf [mol/L]	Cf/Co
0.0	0.00000000	0.00000000
4.4	0.00049297	0.00000388
8.9	0.01072232	0.00008443
13.3	0.08107120	0.00063836
17.8	0.36024380	0.00283657
22.2	1.13761200	0.00895757
26.7	2.83095400	0.02229098
31.1	5.90381400	0.04648672
35.6	10.72232000	0.08442772
40.0	17.52184000	0.13796724
44.4	26.15200000	0.20592126
48.9	36.28590000	0.28571575
53.3	47.40050000	0.37323228
57.8	58.84200000	0.46332283
62.2	69.95660000	0.55083937
66.7	80.41740000	0.63320787
71.1	90.22440000	0.71042835
75.6	98.07000000	0.77220472
80.0	105.26180000	0.82883307
84.4	110.49220000	0.87001732
88.9	115.06880000	0.90605354
93.3	118.33780000	0.93179370
97.8	120.95300000	0.95238583
102.2	122.91440000	0.96782992
106.7	124.22200000	0.97812598
111.1	124.87580000	0.98327402
125.6	126.98760000	0.99990236

Fuente: Elaboración propia

Tabla17. Concentraciones del efluente Caudal 18mL/s

t(h)	C[ppm]	C/Co
0	0.000	0.000000
3	0.017	0.000134
5	0.136	0.001071
8	0.549	0.004319
10	1.543	0.012149
13	3.465	0.027285
14	4.864	0.038301
14	5.407	0.042574

15	6.603	0.051995
18	11.180	0.088031
20	17.326	0.136423
23	24.779	0.195110
25	33.475	0.263579
28	42.889	0.337711
30	52.696	0.414931
33	62.569	0.492667
35	71.918	0.566283
38	81.071	0.638356
40	88.917	0.700132
43	96.109	0.756761
45	101.993	0.803093
48	107.223	0.844277
50	112.454	0.885461
53	115.069	0.906054
55	118.338	0.931794
58	120.299	0.947238
60	122.261	0.962682
63	123.568	0.972978
65	124.222	0.978126
68	124.876	0.983274
70	125.530	0.988422
76	126.998	0.999984

Fuente: Elaboración propia

Tabla18. Concentraciones del efluente Caudal 25 mL/s

t(h)	C(ppm)	Cf/Co
0.0	0	0.000000
1.3	0.04354308	0.0003429
2.5	0.183064	0.0014414
3.8	0.4995032	0.0039331
5.0	1.085308	0.0085457
6.3	2.039856	0.0160619
7.5	3.452064	0.0271816
8.8	5.400388	0.0425227
10.0	7.91098	0.0622912
11.3	11.04922	0.0870017
12.5	14.77588	0.1163455
13.8	19.15634	0.1508373
15.0	23.99446	0.1889328
16.3	29.35562	0.2311466
17.5	34.9783	0.2754197

18.8	40.92788	0.3222668
20.0	47.0736	0.3706583
21.3	53.21932	0.4190498
22.5	59.36504	0.4674413
23.8	65.38	0.5148031
25.0	71.2642	0.5611354
26.3	77.1484	0.6074677
28.8	86.9554	0.6846882
31.3	96.1086	0.7567606
33.8	103.3004	0.8133890
36.3	109.1846	0.8597213
38.8	114.415	0.9009055
41.3	117.684	0.9266457
43.8	120.2992	0.9472378
46.3	122.2606	0.9626819
48.8	123.5682	0.9729780
51.3	124.8758	0.9832740
53.8	125.5296	0.9884220
56.3	126.1834	0.9935701
58.8	126.1834	0.9935701
61.3	126.8372	0.9987181
63.8	126.8372	0.9987181
66.3	126.8372	0.9987181
68.8	126.8372	0.9987181
71.3	126.8372	0.9987181

Fuente: Elaboración propia

Tabla19. Concentraciones del efluente Caudal 50 mL/s

t(h)	C [ppm]	C/Co
0.0	0	0.000000
2.5	5.472306	0.043089
5.0	17.52184	0.137967
7.5	34.78216	0.273875
10.0	54.00388	0.425227
12.5	72.5718	0.571431
15.0	88.263	0.694984
17.5	100.6852	0.792797
20.0	109.8384	0.864869
22.5	115.7226	0.911202
25.0	120.2992	0.947238
27.5	122.9144	0.967830
30.0	124.8758	0.983274
32.5	125.5296	0.988422

35.0	126.1834	0.993570
37.5	126.8372	0.998718
40.0	126.8372	0.998718
42.5	126.8372	0.998718
45.0	126.8372	0.998718
47.5	126.8372	0.998718
50.0	126.8372	0.998718
52.5	126.8372	0.998718
55.0	126.8372	0.998718
57.5	126.8372	0.998718
60.0	126.8372	0.998718
62.5	126.8372	0.998718
65.0	126.8372	0.998718
67.5	126.8372	0.998718
70.0	126.8372	0.998718

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 6. RESULTADOS DE LA SIMULACION VARIANDO ALTURAS DE
LECHO**

Tabla20. Concentraciones del efluente con altura de lecho 0.5 m

t(horas)	Cf(mg/L)	Cf/Ci
0.0	0.00000	0.00000
2.8	1.72603	0.01359
3.3	2.49752	0.01967
3.9	3.45860	0.02723
4.4	4.61583	0.03635
4.7	5.26963	0.04149
5.3	6.73414	0.05302
5.6	7.51870	0.05920
8.3	18.43716	0.14517
11.1	33.53994	0.26409
13.9	50.60412	0.39846
16.7	67.99520	0.53540
19.4	83.03260	0.65380
22.2	95.45480	0.75161
25.0	105.91560	0.83398
27.8	113.10740	0.89061
30.6	117.68400	0.92665
33.3	121.60680	0.95753
36.1	124.22200	0.97813
38.9	124.87580	0.98327

41.7	125.52960	0.98842
44.4	126.18340	0.99357
47.2	126.83720	0.99872
50.0	126.83720	0.99872

Fuente: Elaboración propia

Tabla21. Concentraciones del efluente con altura de lecho 0.8 m

t(horas)	Cf(mg/L)	Cf/Ci
0.00		0
2.78	0.117684	0.00092665
5.56	0.810712	0.00638356
8.33	2.817878	0.02218802
11.11	6.8649	0.05405433
13.89	13.46828	0.10604945
16.67	22.5561	0.17760709
19.44	33.6707	0.26512362
22.22	46.02752	0.36242142
25.00	58.842	0.46332283
27.78	71.2642	0.56113543
30.56	82.3788	0.64865197
33.33	92.1858	0.72587244
36.11	100.6852	0.79279685
38.89	107.877	0.8494252
41.67	113.1074	0.89060945
44.44	117.0302	0.92149764
47.22	120.2992	0.9472378
50.00	122.2606	0.96268189
52.78	123.5682	0.97297795
55.56	124.8758	0.98327402
58.33	125.5296	0.98842205
61.11	126.1834	0.99357008
63.89	126.1834	0.99357008
66.67	126.8372	0.99871811
69.44	126.8372	0.99871811

Fuente: Elaboración propia

Tabla22. Concentraciones del efluente con altura de lecho 1 m

t(horas)	Cf [mol/L]	Cf/Co
0.0	0	0
2.5	0.0169988	0.00013385
5.0	0.1359904	0.00107079
7.5	0.5485382	0.0043192
10.0	1.542968	0.01214935

12.5	3.46514	0.02728457
13.8	4.864272	0.03830135
14.2	5.406926	0.04257422
15.0	6.60338	0.05199512
17.5	11.17998	0.08803134
20.0	17.3257	0.13642283
22.5	24.77902	0.19511039
25.0	33.47456	0.26357921
27.5	42.88928	0.33771087
30.0	52.69628	0.41493134
32.5	62.56866	0.49266661
35.0	71.918	0.56628346
37.5	81.0712	0.63835591
40.0	88.9168	0.70013228
42.5	96.1086	0.75676063
45.0	101.9928	0.80309291
47.5	107.2232	0.84427717
50.0	112.4536	0.88546142
52.5	115.0688	0.90605354
55.0	118.3378	0.9317937
57.5	120.2992	0.9472378
60.0	122.2606	0.96268189
62.5	123.5682	0.97297795
65.0	124.222	0.97812598
67.5	124.8758	0.98327402
70.0	125.5296	0.98842205

Fuente: Elaboración propia

Tabla23. Concentraciones del efluente con altura de lecho 1.2 m

t (horas)	Cf(mg/L)	Cf/Ci
0.00		0
2.78	0.00489042	3.8507E-05
5.56	0.04942728	0.00038919
8.33	0.2340604	0.001843
11.11	0.745332	0.00586876
13.89	1.856792	0.01462041
16.67	3.85742	0.03037339
19.44	7.06104	0.05559874
22.22	11.57226	0.09112016
25.00	17.52184	0.13796724
27.78	24.77902	0.19511039
30.56	33.14766	0.2610052
33.33	42.30086	0.33307764

36.11	51.25792	0.40360567
38.89	61.52258	0.48442976
41.67	70.6104	0.5559874
44.44	79.7636	0.62805984
47.22	87.6092	0.68983622
50.00	94.801	0.74646457
52.78	101.339	0.79794488
55.56	106.5694	0.83912913
58.33	111.146	0.87516535
61.11	114.415	0.90090551
63.89	117.684	0.92664567
66.67	119.6454	0.94208976
69.44	121.6068	0.95753386
72.22	122.9144	0.96782992
75.00	124.222	0.97812598
77.78	124.8758	0.98327402
80.56	125.5296	0.98842205
83.33	126.1834	0.99357008

Fuente: Elaboración propia





HORTENCIA FLORES MAMANI

hortenciaflores.m15@gmail.com

78847320



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

MINISTERIO DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL



DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-256-D/2024
La Paz, 23 de octubre de 2024

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha 18 de octubre de 2024 via On-Line, por HORTENCIA FLORES MAMANI con C.I. N° 8333915 LP, con número de trámite DA 263-DIG/2024, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN DE LECHO FIJO PARA REMOCIÓN DEL METAL Zn "DAM-MILLUNI", CON NANOPARTICULAS DE Cu/Fe SOPORTADAS EN CASCARA DE CASTAÑA", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 585,
entre Dq. Uruguay y
C. Estación Ilumant.
Télf.: 275728
174026 - 274951

Oficina - Sucre
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijara,
N° 27, Col. Suroccidental
Télf.: 272751 - 2704298

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 117,
entre H. de Julio y Antezana
Télf.: 474461 - 2042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablos, N° 2560
Edif. Multicentro S. Centro
Lda. Pasa 1, Of. 58,
Zona 7a de Julio
Télf.: 241001 - 2040028

Oficina - Ortopiza
Calle El Comercio, N° 366
calle c/ra. Urutagoitza,
Zona Parque Bolívar
Télf.: 2000873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle Dto. Vélez y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 242
Télf.: 7076386

Oficina - Orán
Calle 6 de Octubre, N° 5602,
entre Ayllu O'cho
y Junta, Calata Central,
Of. 14
Télf.: 6227288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Rúa y San Alberto,
Edif. AN. Salinas N° 240,
Pimer Pasa, Of. 11
Télf.: 2008160

www.senapi.gob.bo



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

MINISTERIO DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL

Que, el Decreto Supremo, N° 4218 del 14 de abril de 2020, regula el teletrabajo como una modalidad especial de prestación de servicios caracterizada por la utilización de Tecnologías de la Información y Comunicación - TIC, en los sectores públicos y privados, estableciendo a través de su Artículo 12 que "con el objeto de implementar y, promover el teletrabajo, las entidades públicas, deben desarrollar e implementar una estrategia de digitalización para la atención de trámites y servicios en línea en el marco del Plan de Implementación del Gobierno Electrónico ...".

Que, mediante Resolución Administrativa N° 14/2020 del 22 de abril de 2020, el Director General Ejecutivo del SENAPI, Resuelve: "... Aprobar el Reglamento para trámites On-Line de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos del Servicio Nacional de Propiedad Intelectual ..."

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"DISEÑO DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN DE LECHO FIJO PARA REMOCIÓN DEL METAL Zn "DAM-MILLUNI", CON NANOPARTICULAS DE Cu/Fe SOPORTADAS EN CASCARA DE CASTAÑA"** a favor de la autora y titular: **HORTENCIA FLORES MAMANI** con C.I. N° 8333915 LP, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/m

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI
CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
LA PAZ - BOLIVIA

Firma:



ACyJ2jH5FK7K

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLEAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 265,
entre Dao, Zingaray y
C. Rosalón Miramón.
Tel.: 2159208
2198265 - 2198391

Oficina - Tarija
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quiroga,
N° 24, Edif. Gobernación.
Tel.: 2227121 - 2242928

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 171,
entre 14 de Julio y Arce.
Tel.: 4144821 - 4242927

Oficina - Oruro
Av. Juan Pablo II, N° 2500
Edif. Matrimonio O. Ceña
Lda. Pte. 1, Of. 5B,
Zona 14 de Julio.
Tel.: 2141001 - 2242028

Oficina - Chuquisaca
Calle Nómada, N° 366
cas. exq. Urutalagosa,
Zona Parque Solares.
Tel.: 2302873

Oficina - Toluca
Av. La Paz, entre
Calle G. P. y A. 370
Edif. Santa Clara, N° 241.
Tel.: 2278386

Oficina - Oriz
Calle 4 de Octubre, N° 1622,
entre Ayala y Cho
y Junta, Calentá Central,
Of. 14.
Tel.: 2727228

Oficina - Potosí
Av. Villalba entre calles
Wenceslao Mica y San Roberto,
Edif. AM. Salinas N° 240,
Pinar Pico, Of. 14.
Tel.: 2218160

www.senapi.gob.bo

